

**HAVAYOLU VE KARAYOLU  
ARAÇ FİLOSU İLE  
BİR ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN  
MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ**

**Doktora Tezi**

**Ömer Osman DURSUN**

**Eskişehir, 2017**

**HAVAYOLU VE KARAYOLU ARAÇ FİLOSU İLE BİR ARAÇ ROTALAMA  
PROBLEMİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ**

**Ömer Osman DURSUN**

**DOKTORA TEZİ**

**Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Asuman ÖZGER**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Mayıs, 2017**

*Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1406F322 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ömer Osman DURSUN'un "Havayolu ve Karayolu Araç Filosu ile Bir Araç Rotalama Problemi için Matematiksel Model Önerisi" başlıklı tezi 11/04/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Yrd. Doç. Dr. Asuman ÖZGER

Üye : Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ

Üye : Prof. Dr. Muzaffer KAPANOĞLU

Üye : Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK

Üye : Doç. Dr. Hakan OKTAL

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### HAVAYOLU VE KARAYOLU ARAÇ FİLOSU İLE BİR ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

Ömer Osman DURSUN

Havacılık Elektrik – Elektronik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Asuman ÖZGER

Son zamanlarda taşımacılıkta Araç Rotalama Problemleri (ARP) önemli rol oynamaktadır. Taşımacılık firmaları, ARP ile ilgili matematiksel modeller kullanarak maliyet, insan, araç ve yakıt gibi kaynaklardan tasarruf sağlamaktadır. Çalışmada Çok Depolu Heterojen Filolu Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi (ÇDHFZPARP) ele alınmıştır. Heterojen filo olarak karayolu araçlarının yanı sıra havayolu araçları kullanılmıştır. Havayolu araçlarına ait maliyet ve kriterler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, ÇDHFZPARP'ye yönelik iki matematiksel model ve çözümleri ortaya konmuştur. Matematiksel modellerin çözümünde gerçek talep, gerçek havayolu ve karayolu maliyet verileri kullanılmıştır. Matematiksel modellerin çözümünde GAMS programından yararlanılmıştır. Matematiksel modeller iki senaryoya göre çözülmüştür. İlk senaryoda, taleplerin teslim edilmesinde süre sınırı konmamıştır. Diğer senaryoda ise taleplerin teslim edilmesinde süre dikkate alınmıştır. Süre sınırı olmadığında taleplerin karşılanmasında sadece karayolu araçları kullanılırken, diğer durumda ise hem havayolu hem de karayolu araçları kullanılmış ve maliyet yüksek çıkmıştır. İkinci matematiksel modelde ise depo noktalarının seçimi için iki farklı depo açma maliyeti belirlenmiştir. Depo açma maliyetine göre farklı depo noktalarının seçilebileceği görülmüştür. Sonuç olarak, çalışmada geliştirilen matematiksel modeller ve çözümleri taşıma firmalarına yük taşımacılığında çoklu depo, zaman, havayolu ve karayolu taşımacılığı açısından uygun bir bilimsel yaklaşım sunmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Araç rotalama problemi, Çok depo, Havayolu taşımacılığı, Heterojen filo, Zaman penceresi.

## ABSTRACT

### MATHEMATICAL MODEL SUGGESTION FOR A VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH THE FLEET OF AIR AND ROADWAY VEHICLES

Ömer Osman DURSUN

Department of Aviation Electrics and Electronics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, May, 2017

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Asuman ÖZGER

Recently, Vehicle Routing Problems (VRP) have played an important part in transportation. Transportation companies save from cost and resources such as human, vehicle and fuel using mathematical models related with VRP. Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Time Window (MDHFTWVRP), which is one of the VRP types, is considered in the study. Besides the road vehicles, especially air vehicles have been used as heterogeneous fleet. Costs and criteria for air vehicles have been examined in detail. In the study, two mathematical models for MDHFTWVRP and their solutions are presented. In the solution of mathematical models, real demand, real air and road costs were used. GAMS software was used in the solutions of the mathematical models. Mathematical models were solved according to two scenarios. In the first scenario, the time wasn't considered in the delivery of the demands. In the other scenario, the time was considered in the delivery of the demands. When the time period wasn't considered, only the road vehicles were used for delivery of the demands. In the second scenario both air and road vehicles were used and the cost was higher than the first scenario. In the second mathematical model, two different depot opening cost were determined for the selection of the depot nodes. It is shown that different depot nodes could be selected according to the depot opening cost. As a result, the mathematical models and their solutions developed in the study present a suitable scientific approach in terms of multi-depot, time, air and road transportation in freight transportation for the transportation companies.

**Keywords:** Air transportation, Heterogeneous fleet, Multi depot, Time windows, Vehicle routing problem.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bana her konuda yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Asuman ÖZGER'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmamın yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde görüşleriyle yol gösteren Sayın Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ'ye, Sayın Doç. Dr. Hakan OKTAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Görüş ve önerileriyle tez çalışmama katkıda bulunan değerli arkadaşlarım Sayın Orkun BAŞKAN'a ve Sayın Suat TORAMAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında, Ekol Lojistik firması ile irtibata geçmemizi sağlayan Sayın Ümit Ali ÖZKAZANCI'ya, kullanılan verilerin elde edilmesinde Ekol Lojistik firmasına, Ekol Lojistik Ar-Ge Merkezi Direktörü Sayın Erdem ÖZSALİH'e ve Proje Yönetimi Ofis Sorumlusu Sayın Elif ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana her anlamda destek olan değerli aileme, desteklerini her zaman hissettiğim sevgili eşim Burçin AYZ DURSUN'a ve canım oğlum Muhammed Yusuf DURSUN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ömer Osman DURSUN

Mayıs 2017

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Ömer Osman DURSUN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE TÜRLERİ.....	9
2.1. Klasik Araç Rotalama Problemi.....	11
2.2. Heterojen Filolu Araç Rotalama Problemi.....	16
2.3. Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi .....	17
2.4. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi .....	20
2.5. Eş Zamanlı Dağıt-Topla Araç Rotalama Problemi.....	22
2.6. Dinamik Araç Rotalama Problemi .....	23
2.7. Stokastik Araç Rotalama Problemi.....	24
2.8. Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi .....	24
2.9. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi.....	24
2.10. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi .....	26
3. LİTERATÜRDE İNCELENEN MATEMATİKSEL MODELLER .....	28
3.1. KARP Matematiksel Modelleri .....	28
3.1.1. Asimetrik KARP matematiksel modeli.....	28
3.1.2. Üç indisli KARP matematiksel modeli.....	29
3.1.3. Simetrik KARP matematiksel modeli .....	31
3.1.4. KARP için yük akış matematiksel modeli .....	32
3.2. HFARP Matematiksel Modeli.....	34
3.3. ZPARP Matematiksel Modeli .....	35
3.4. ÇDHFARP Matematiksel Modeli.....	39

<b>4. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELLER .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. Araştırma Problemi .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. Araştırmanın Amacı .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3. Araştırmanın Önemi.....</b>	<b>44</b>
<b>4.4. Araştırmanın Kapsam ve Yöntemi.....</b>	<b>46</b>
<b>4.5. Matematiksel Modeller .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.1. Matematiksel model 1 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.2. Matematiksel model 2.....</b>	<b>51</b>
<b>4.6. Veriler.....</b>	<b>56</b>
<b>4.6.1. Havayolu maliyetleri.....</b>	<b>56</b>
<b>4.6.1.1. Doğrudan işletme maliyetleri .....</b>	<b>57</b>
<b>4.6.1.2. Dolaylı işletme maliyetleri.....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.2. Havayolu taşımacılığında kullanılan uçak tipleri .....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.3. Uçakların yakıt maliyeti .....</b>	<b>61</b>
<b>4.6.4. Karayolu taşımacılığında kullanılan araç tipleri ve yakıt maliyeti</b>	<b>64</b>
<b>4.6.5. Matematiksel modellerde kullanılan parametreler .....</b>	<b>65</b>
<b>4.6.5.1. Mesafe verileri.....</b>	<b>65</b>
<b>4.6.5.2. Seyahat süresi.....</b>	<b>65</b>
<b>4.6.5.3. Sabit maliyet.....</b>	<b>65</b>
<b>4.6.5.4. LTO maliyeti .....</b>	<b>66</b>
<b>4.6.5.5. Birim taşıma maliyeti .....</b>	<b>66</b>
<b>4.6.5.6. Ceza maliyeti .....</b>	<b>66</b>
<b>4.6.5.7. Araç sayısı .....</b>	<b>67</b>
<b>4.6.5.8. Araç kapasitesi.....</b>	<b>67</b>
<b>4.6.5.9. Araç kapasite oran parametresi .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6.5.10. Talep .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6.5.11. Menzil .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6.5.12. Depo açma maliyeti .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6.5.13. Deponun kapasitesi.....</b>	<b>69</b>
<b>4.6.5.14. Hizmet süresi.....</b>	<b>69</b>
<b>4.6.5.15. Servise en erken başlama zamanı.....</b>	<b>69</b>
<b>4.6.5.16. Servise en geç başlama zamanı.....</b>	<b>69</b>

<b>5. MATEMATİKSEL MODELLERİN UYGULANMASI .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1. Matematiksel Model 1'in Uygulanması .....</b>	<b>70</b>
<b>5.2. Matematiksel Model 2'nin Uygulanması .....</b>	<b>76</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>87</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>89</b>

## **EKLER**

**EK-1. Matematiksel Model 1 GAMS Kodu**

**EK-2. Matematiksel Model 2 GAMS Kodu**

**EK-3. Matematiksel Model 1 Senaryo 1 İstatistikler**

**EK-4. Matematiksel Model 1 Senaryo 2 İstatistikler**

**EK-5. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 İstatistikler - 1**

**EK-6. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 İstatistikler - 2**

**EK-7. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 İstatistikler - 3**

**EK-8. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 İstatistikler - 4**

## **ÖZGEÇMİŞ**

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1.</b> Dünyada Yük Taşımacılığının Ulaşım Türlerine Göre Dağılımı.....	3
<b>Çizelge 1.2.</b> Ulaşım Türü Ve Yük Miktarının Ülkelere Göre Karşılaştırılması.....	3
<b>Çizelge 1.3.</b> Türkiye'de Yük Taşımacılığının Ulaşım Türlerine Göre Dağılımı .....	4
<b>Çizelge 1.4.</b> Türkiye'de Havayolu Taşımacılığı ile Taşınan Yük Miktarı .....	5
<b>Çizelge 4.1.</b> Yük Taşımacılığı Yapan Çeşitli Havayolları ve Kullandıkları Uçak Tipleri .....	60
<b>Çizelge 4.2.</b> Çalışmada Kullanılan Uçak Tiplerinin Özellikleri.....	61
<b>Çizelge 4.3.</b> Uçak Tipine Göre Kullanılan Motor Tipi ve Sayısı .....	62
<b>Çizelge 4.4.</b> LTO Esnasındaki Süreler .....	62
<b>Çizelge 4.5.</b> Birim Taşıma ve LTO Maliyeti .....	64
<b>Çizelge 4.6.</b> Kullanılan Karayolu Araç Tipleri ve Özellikleri.....	64
<b>Çizelge 4.7.</b> Karayolu Araçlarına Ait Maliyetler .....	65
<b>Çizelge 4.8.</b> Araç Türleri ve Kapasiteleri .....	67
<b>Çizelge 5.1.</b> Havaalanları ve ICAO Kodları (Model-1) .....	71
<b>Çizelge 5.2.</b> Model-1 Veri Seti Talep Verileri .....	72
<b>Çizelge 5.3.</b> Matematiksel Model 1 Gams Sonuçları .....	73
<b>Çizelge 5.4.</b> Havaalanları ve ICAO Kodları (Matematiksel Model 2).....	77
<b>Çizelge 5.5.</b> Matematiksel Model 2 Veri Seti Talep Verileri .....	78
<b>Çizelge 5.6.</b> Matematiksel Model 2 Gams Sonuçları .....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Türkiye’de Havayolu ile Taşınan Yük Miktarı 2008-2016 (ton).....	5
Şekil 1.2. 2012-2032 Yılları Arasında Hava Kargoda Beklenen Değişim.....	6
Şekil 2.1. ARP’nin Genel Gösterimi .....	9
Şekil 2.2. Tasarruf Algoritması .....	13
Şekil 3.1. Zaman Çizelgesi .....	38
Şekil 4.1. Havayolu Maliyetlerinin Yapısı .....	56
Şekil 5.1. Matematiksel Model 1 Senaryo 1 Rotalar .....	74
Şekil 5.2. Matematiksel Model 1 Senaryo 2 Rotalar .....	75
Şekil 5.3. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$10000) .	81
Şekil 5.4. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$10000) .	82
Şekil 5.5. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$50000) .	83
Şekil 5.6. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$50000) .	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\Delta^+(i)$	: İleri Doğru Yıldız ( <i>i</i> noktasından gidilebilecek noktalar)
$\Delta^-(i)$	: Geriye Doğru Yıldız ( <i>i</i> noktasına gelinen noktalar)
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ARP	: Araç Rotalama Problemi
AÖDSTARP	: Asimetrik Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi
AUARP	: Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi
BADA	: The Base of Aircraft Data (Uçak Verileri Tabanı)
BTARP	: Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi
CAA	: Civil Aviation Authority (İngiltere Sivil Havacılık Otoritesi)
ÇDARP	: Çok Depolu Araç Rotalama Problemi
ÇDHFARP	: Çok Depolu Heterojen Filolu Araç Rotalama Problemi
ÇDHFZPARP	: Çok Depolu Heterojen Filolu Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi
DARP	: Dinamik Araç Rotalama Problemi
DHMİ	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi
EUROCONTROL	: European Organisation for the Safety of Air Navigation (Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı)
EZDTARP	: Eş Zamanlı Dağıt-Topla Araç Rotalama Problemi
EZDTGSP	: Eş Zamanlı Dağıt-Topla Gezgin Satıcı Problemi
FAA	: Federal Aviation Administration (Federal Havacılık İdaresi-Amerika Sivil Havacılık Otoritesi)
GAMS	: The General Algebraic Modeling System (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi)
GSP	: Gezgin Satıcı Problemi
HFARP	: Heterojen Filolu Araç Rotalama Problemi
IATA	: The International Air Transport Association (Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği)

ICAO	: International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Otoritesi)
KARP	: Klasik Araç Rotalama Problemi
LTO	: Landing and Take-off (Kalkış-Tırmanma-İniş)
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü)
ÖDSTARP	: Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi
ÖDSTGSP	: Önce Dağıt Sonra Topla Gezgin Satıcı Problemi
SARP	: Stokastik Araç Rotalama Problemi
ZPARP	: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi
ZPGSP	: Zaman Pencereci Gezgin Satıcı Problemi

## 1. GİRİŞ

Firmaların iç ve dış ticarete artan rekabet ortamında maliyetlerini azaltıp kazançlarını arttırmak için faydalandıkları bir sektör olan lojistik, her geçen gün önem kazanmaktadır. Lojistik, müşterilerin taleplerini karşılayacak şekilde ürünün, başlangıcından teslimine kadar olan depolama, taşıma, dağıtma, eğer uluslararası bir taşıma mevcutsa sigortalama, gümrükleme ve teslim süreçlerini kapsayan faaliyetler bütünüdür. Genellikle lojistik kavramı ile karıştırılan taşımacılık, lojistiğin en önemli faaliyet alanını oluşturmaktadır. Taşımacılık, yolcuların ya da yüklerin bir yerden başka bir yere ulaşımını sağlayan sektördür. Taşımacılık sektörünün temel amacı, taşıma talebini, mümkün olan en kısa zamanda ve en az maliyetle, güvenilir bir şekilde sunmaktır. Taşımacılık sektörü, diğer sektörlerle yakın ilişkisi olan ve bu sektörlerin üretkenliği üzerinde önemli rol oynayan bir hizmet sektörüdür. Bütün sektörlerle iç içe olması ve onları etkilemesi sebebiyle çok önemlidir. Taşımacılık, kullanılan taşıma araçlarına göre karayolu, demiryolu, denizyolu, havayolu taşımacılığı şeklinde sınıflandırılmaktadır [1, 2].

Karayolu taşımacılığı, en fazla kullanılan taşıma türüdür. Geniş bir yol ağına sahip olan bu taşımacılık türünde, yüklemenin ve indirmenin hızlı gerçekleştirilebilmesi, tarifeli taşımaların yaygın bir şekilde yapılabilmesi, teslimatın kapıdan kapıya götürülebilmesi gibi birçok neden karayolu taşımacılığının tercih edilme sebebidir. Ancak demiryolu ve denizyolu ile karşılaştırıldığında taşıma maliyetinin yüksek olması, trafik, hava koşulları ve çevresel faktörlerden kolaylıkla etkilenmesi gibi sebepler bu taşıma türüne olan talebi azaltmaktadır.

Demiryolu taşımacılığı, parasal anlamda değeri az olan, ağırlık ve hacim bakımından büyük yükler için fazla maliyet gerektirmeyen taşıma türüdür. Yapım, bakım ve onarım maliyetlerinin başlangıçta yüksek olmasından dolayı genellikle devlet tarafından yapılıp işletilmektedir. Yükün uzun mesafeli taşınmasında ve tesliminin zamandan bağımsız olduğu durumda, büyük miktarda maliyet avantajları sağlamaktadır. Demiryolu taşımacılığı gelişmiş ülkelerde ön plandadır. Gelişmiş ülkelerde demiryolu projeleri karayolu taşımacılığı ile bir bütün teşkil edecek ve birbirini tamamlayacak şekilde yapılmaktadır. Sevkiyat süresinin uzunluğu demiryolu taşımacılığının dezavantajını oluşturmaktadır.

Denizyolu taşımacılığı, kıtalararası taşımacılıkta çok kullanılan bir taşıma türüdür. Diğer taşıma türlerine göre güvenli ve daha düşük maliyetlidir. Konteyner ile taşınabilen yükler ile çok büyük miktardaki yükler (hammadde, petrol, sıvı, gaz, kuru yük ve parasal olarak değeri az ürünler) genellikle denizyolu ile taşınmaktadır. Ucuz olmasından dolayı diğer taşıma türlerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Genellikle uluslararası uzak mesafeli taşımacılıkta kullanılmaktadır. Ulaşım ağının sınırlı olması en büyük dezavantajdır [1].

Havayolu taşımacılığı, hızlı ve güvenilir bir ulaşım olması sebebiyle uzak yerleri birbirine yakınlaştırmakta böylece hem sosyal yaşam ve kültürel gelişime katkıda bulunmakta hem de turizm ve iş sektörlerine fayda sağlamaktadır. Firmaların küresel piyasalara erişimlerini sağlayarak, ülke ekonomisinin ve küresel ekonominin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Havayolu taşımacılığını diğer taşıma türlerinden ayıran en önemli özellik, ulaşımı zor olan bölgelere kolay ve hızlı ulaşım imkânı sağlamasıdır. Diğer taşıma türlerine göre maliyetli olması ise hava taşımacılığının en büyük dezavantajıdır [3].

Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD)'nden ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulaştırma Bakanlığında alınan yük taşımacılığı verilerine göre dünyada 2015 yılı itibariyle yükün %48,8'i karayolu, %32,1'i demiryolu, %18,7'si denizyolu, %0,4'ü ise havayolu ile taşınmıştır. Dünyada yükün önemli bir kısmının karayolu ile taşındığı, demiryolu ve denizyolunun ise uzak mesafelerde, süre kısıtı olmayan yüklerin taşınmasında tercih edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra havayolu yük taşımacılığı payının diğer taşıma türlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Elektronik ticaretin gelişmesi ve müşteri beklentileri süre açısından göz önüne alındığında, havayolu taşımacılığı diğer taşıma türlerine göre daha avantajlı olmaktadır. Bu kapsamda ilerleyen yıllarda yük taşımacılığında havayolunun payının artacağı tahmin edilmektedir. Çizelge 1.1'de dünyada yük taşımacılığının ton-km cinsinden yüzde olarak ulaşım türlerine göre dağılımı ve yıllara göre değişimi verilmiştir [4, 5].

**Çizelge 1.1. Dünyada Yük Taşımacılığının Ulaşım Türlerine Göre Dağılımı (ton-km)**

Yıllar	Karayolu %	Demiryolu %	Denizyolu %	Havayolu %
2005	38,4	38,4	22,7	0,5
2006	37,6	38,7	23,1	0,5
2007	37,4	37,8	24,3	0,5
2008	46,3	36,5	16,7	0,4
2009	45,9	34,4	19,3	0,4
2010	45,3	34,2	20,1	0,4
2011	46,2	33,5	19,9	0,4
2012	47,2	32,2	20,3	0,3
2013	48,0	32,3	19,4	0,3
2014	49,2	31,4	19,0	0,4
2015	48,8	32,1	18,7	0,4

Avrupa Komisyonu tarafından 2016 yılında hazırlanan Ulaştırma konulu rapora göre, Avrupa Birliği (AB) üyesi 28 ülke, Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Japonya, Çin, Rusya ve Türkiye'deki yük taşımacılığı ulaştırma türlerine göre karşılaştırılmıştır. Bu ülkeler arasında yük taşımacılığında en fazla karayolunun tercih edildiği görülmektedir. Havayolu taşımacılığının taşımacılıktaki payı AB üyesi ülkelerde %0,1, ABD'de ise %0,8'dir. Diğer ülkelerde ise bu payın diğer taşıma türlerine göre kıyaslanamayacak derecede düşük olduğu görülmektedir. Yük taşımacılığında havayolu taşımacılığı diğer taşıma türlerine göre daha az tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri özellikle havayolu maliyetlerinin yüksek olması olarak ifade edilmektedir. Yapılacak çeşitli yasal düzenlemeler ve havayolu maliyetlerinin azaltılması ile hızlı ve güvenilir taşımacılık türlerinden biri olan havayolu yük taşımacılığının, gelecekte payını arttıracak bir sektör olduğu tahmin edilmektedir. Çizelge 1.2'de ülke ve ulaşım türlerine göre yük değerleri görülmektedir [4-8].

**Çizelge 1.2. Ulaşım Türü ve Yük Miktarının Ülkelere Göre Karşılaştırılması (ton-km)**

	AB (28 ülke) 2014 (%)	ABD 2013 (%)	Japonya 2013 (%)	Çin 2014 (%)	Rusya 2014 (%)	Türkiye 2015 (%)
<b>Karayolu</b>	52,9	56,6	50	33,6	9,5	88,3
<b>Demiryolu</b>	12,6	34	4,9	15,2	89,1	3,8
<b>Denizyolu</b>	34,4	8,5	43,2	51,1	1,2	6,9
<b>Havayolu</b>	0,1	0,8	1,9	0,1	0,2	1

Çizelge 1.3'e göre 2015 yılı itibari ile Türkiye'de yükün, %88,2'sinin karayolu, %3,8'inin demiryolu, %6,9'unun denizyolu ve %1'inin havayolu ile taşındığı görülmektedir. Havayolunun payı diğer ulaşım türlerine göre oldukça düşüktür. Çizelge 1.3'de Türkiye'de yük taşımacılığının ton-km cinsinden ulaşım türlerine göre dağılımı ve yıllara göre değişimi verilmiştir [4, 8].

**Çizelge 1.3.** *Türkiye'de Yük Taşımacılığının Ulaşım Türlerine Göre Dağılımı (ton-km)*

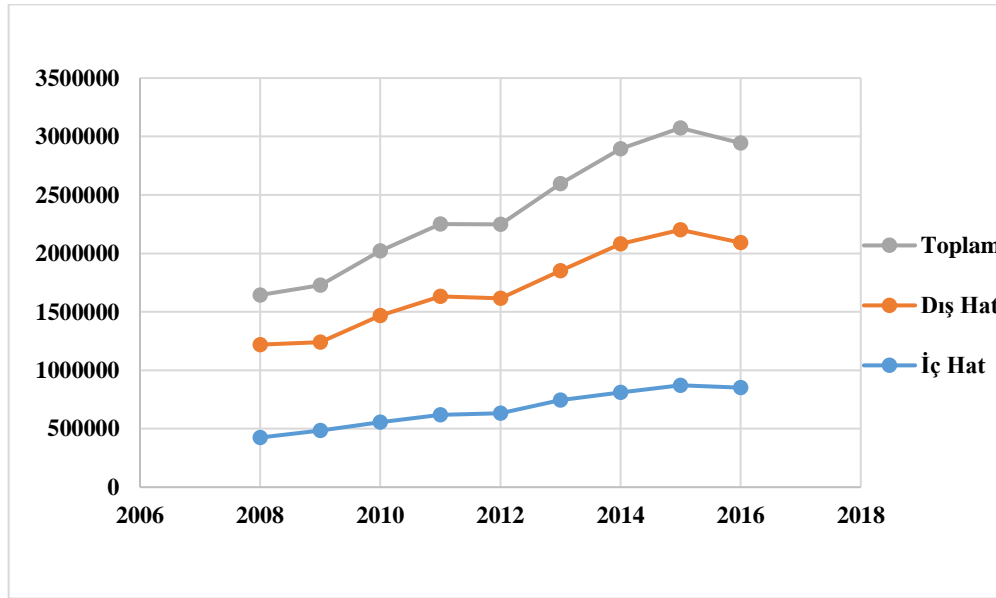
Yıllar	Karayolu %	Demiryolu %	Denizyolu %	Havayolu %
2005	91,2	5	3,5	0,2
2006	91,2	5	3,6	0,2
2007	90,1	4,9	4,8	0,2
2008	89,1	5,3	5,4	0,2
2009	88,7	5,2	5,7	0,4
2010	88,3	5,3	5,8	0,5
2011	87,4	5	6,9	0,7
2012	87,5	4,7	6,9	0,8
2013	87,1	4,3	7,7	0,9
2014	87,6	4,5	6,9	1
2015	88,2	3,8	6,9	1

Ülkemizde 2008 ve 2016 yılları arasında havayolu ile taşınan yük miktarı, iç hatlarda %33,5 dış hatlarda ise %26,3 artmıştır. 2016 yılı itibari ile iç hatlarda bir önceki yıla oranla taşınan yük miktarında %1,1 düşüş, dış hatlarda ise %2,6 düşüş meydana gelmiştir. Çizelge 1.4'de 2008 ve 2016 yılları arasında ülkemizde havayolu ile iç ve dış hatlarda taşınan yük miktarı görülmektedir [9].

**Çizelge 1.4. Türkiye’de Havayolu Taşımacılığı ile Taşınan Yük Miktarı (2008-2016)**

Yıl	Yük (Ton)		
	İç hat	Dış hat	Toplam
2008	424 555	1 219 459	1 644 014
2009	484 833	1 241 512	1 726 345
2010	554 710	1 466 366	2 021 076
2011	617 835	1 631 639	2 249 474
2012	633 076	1 616 057	2 249 133
2013	744 028	1 851 289	2 595 317
2014	810 858	2 082 142	2 893 000
2015	871 327	2 201 504	3 072 831
2016	851 964	2 090 920	2 942 884
08/16 değişim %	33,5	26,3	28,3
15/16 değişim %	-1,1	-2,6	-2,2

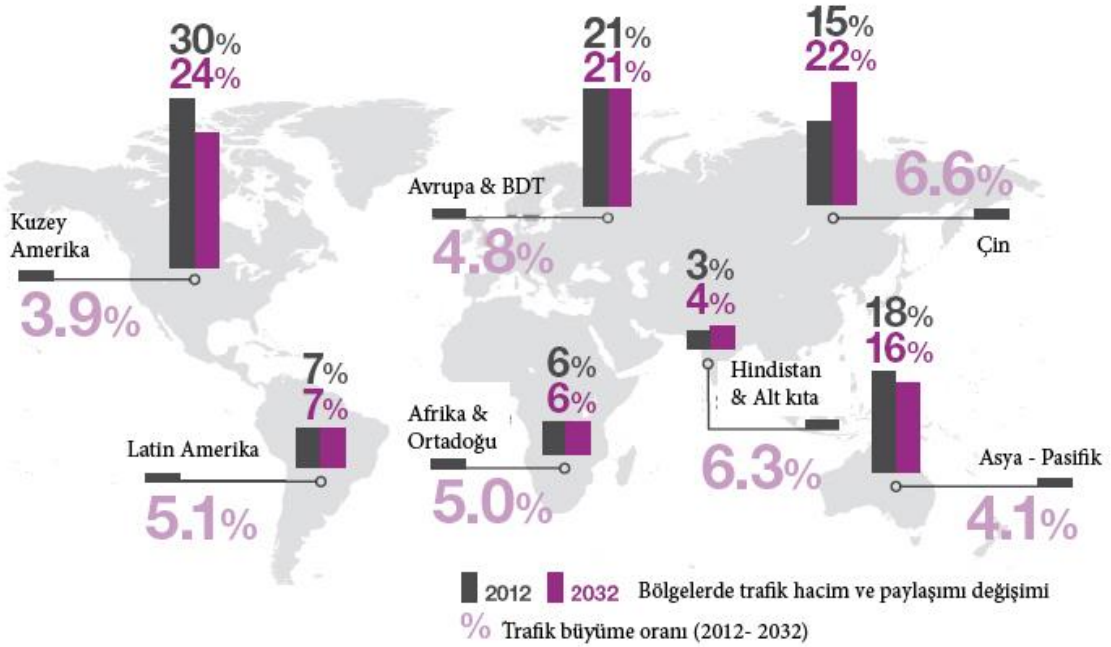
Ülkemizde 2008-2016 yılları arasındaki havayolu taşımacılık verileri incelendiğinde, havayolu yük taşımacılığında iç hatlarda artış, dış hatlarda ise küresel ekonomik krizin de etkisiyle az da olsa bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 1.1).



**Şekil 1.1. Türkiye’de Havayolu ile Taşınan Yük Miktarı 2008-2016 (ton) [9].**

Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) 2017 yılından 2019 yılına kadar, ülkemizde havayolu ile iç hat yük taşımacılığında %5, dış hat yük taşımacılığında ise %12 oranında artış olacağını tahmin etmektedir [9].

Airbus, 2012-2032 yılları arasında dünya genelinde havayolu trafiği artacağını ve hava kargonun çekim gücünün doğuya doğru kayacağını ifade etmektedir. Bu tahminlere göre Çin'in bulunduğu Doğu Asya'da hava trafiğinin %6,6 oranında artacağı, yük trafiğinin ise %15'den %22'ye çıkacağı tahmin edilmektedir. Buna paralel olarak yaşanacak gelişmelerden ülkemizin de konumu itibari ile payını alacağı ifade edilmektedir. Şekil 1.2'de 2012-2032 yılları arasında hava kargoda beklenen değişim ve hava trafiğinde beklenen artış görülmektedir [10].



**Şekil 1.2.** 2012-2032 Yılları Arasında Hava Kargoda Beklenen Değişim [10].

Küreselleşme ve elektronik ticaretin yaygınlaşması insanların her ürüne kısa sürede ulaşma isteklerini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde sanayi sektöründen yiyecek sektörüne kadar akla gelebilecek hemen her alanda yük taşımacılığı, ön plana çıkmaktadır. Lojistik ve kargo sektörlerindeki gelişme bütün sektörleri olumlu yönde etkilemektedir. Lojistik ve kargo sektörleri aynı zamanda üretici ile tüketici arasında köprü görevi görmektedir. Üreticinin mallarını pazarlara daha hızlı ve daha düşük maliyetle sunma fırsatı bulabilmesi taşımacılık alanında hizmet veren bu sektörleri önemli hale getirmektedir [11, 12].

Uzak konumlar arasında taşımada genellikle birden fazla ulaşım sistemi kullanılmaktadır. Son zamanlardaki taşıma anlayışı da, ulaştırma alt sistemlerinin tümünden faydalanılarak taşımacılığın bir bütün olarak ele alınması doğrultusundadır [1, 2].

Her sektörde olduğu gibi lojistik ve kargo sektörlerinde de karar verme süreci çok önemlidir. Karar destek sistemlerinin kullanılması ile taşıma süresi ve maliyetin azaltılması, taşıma süresindeki değişkenliğin azaltılması ve zamanında teslimat sağlanabilir. Diğer yandan taşıma türlerinin birlikte kullanılması ile sürekli ulaştırma hizmetinin sağlanması, en az hasar, en az kayıp, en az gecikme ile teslimat ve depolamanın iyileştirilmesine katkı sağlanması mümkündür.

Lojistik firmaları birçok faktörü değerlendirerek karar verme sürecinde sektördeki pay ve kârlarını arttıracak, maliyetlerini azaltacak kısa ve uzun vadeli stratejik plan yaparlar. Lojistik firmalarının karar verme sürecinde yaygın olarak karşılaştığı problemler; taşıma türü seçimi, filo planlama, araç rotalama ve araç çizelgelemedir.

Taşıma türü seçiminde; hizmetin verilme sıklığı, güvenlik, hız, maliyet, müşteri hizmeti, taşıma süresindeki değişkenlik, taşıma süresi, erişebilirlik, güvenilirlik faktörleri önemli rol oynamaktadır.

Filo planlamada amaç; istenen hizmet seviyesinde, müşterilerin talebini karşılayacak araç türü ve sayısını maliyeti en küçükleyecek şekilde belirlemektir.

Araç rotalama problemi (ARP), birden fazla aracın müşterilerin talep ve istekleri doğrultusunda araçların özelliklerini ve operasyonel kısıtları dikkate alarak bir depodan başlayıp yine aynı depoda veya bir müşteri noktasında sonlanan en küçük maliyetli rotaların belirlendiği problemdir.

Araç çizelgeleme probleminde başlıca çözülmesi gereken problem, süredir. Kaç aracın, hangi gün ve zaman dilimlerinde, nereden nereye gitmesi gerektiği ile ilgili olan problem biçimidir [13].

Lojistik ve kargo şirketlerinde firmanın geleceği açısından mevcut kaynakları asgari ölçüde kullanarak kârlılık oranının artırılması, müşteri memnuniyetinin sağlanması ancak iyi bir filo planlama ve araç rotalama ile mümkündür.

Bu doğrultuda, çalışmada temel olarak lojistik ve kargo taşımacılığında ARP'ye yönelik karar vericilere kararlarında yardımcı olabilecek, lojistik ve kargo firmalarının araç rotalama sistemlerine yeni bir boyut kazandıracak matematiksel model oluşturulması ve matematiksel modelin çözümünün ortaya koyulması hedeflenmiştir.

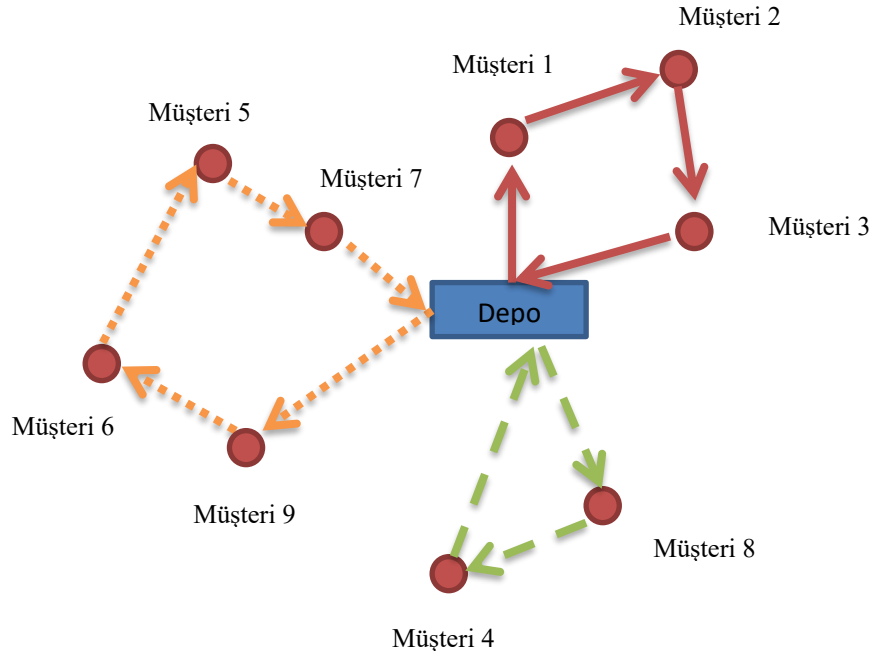
Çalışmanın, ARP'ye yönelik olarak önceki çalışmalardan farkları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Farklı taşıma türlerinin birlikte kullanılması (karayolu ve havayolu),
- Taşıma türlerine ait farklı tipte araçların kullanılması (heterojen filo),
- Çok depo kullanılması,
- Menzil kısıtının kullanılması,
- Zaman kısıtının kullanılması,
- Belirsiz depo kısıtının kullanılması,
- Tüm maliyet, mesafe ve menzil verileri için gerçek verilerin kullanılması,
  - Uçak tipi ve kullanılan motor türüne göre yakıt miktarının ve maliyetinin hesaplanması,
  - Uçak tipine göre birim taşıma maliyetinin hesaplanması,
  - Havaalanları arasındaki gerçek uçuş mesafelerinin aletli uçuş kuralları ve irtifa dikkate alınarak hesaplanması,
  - Uçak tipleri için uçak üreticilerinin vermiş oldukları gerçek uçak menzillerinin kullanılması,
  - Gerçek karayolu mesafe verilerinin kullanılması,
  - Karayolu araçları için Ekol Lojistik firmasından elde edilen gerçek birim taşıma maliyeti ve sabit maliyetlerin kullanılması,
  - Ekol Lojistik firmasından elde edilen gerçek talep verilerinin kullanılmasıdır.

Çalışmanın 2. bölümünde konu ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. 3. bölümde literatürde incelenen matematiksel modellere, 4. bölümde araştırma problemi, araştırmanın amacı, önemi, yöntemi ve geliştirilen matematiksel modeller konularına değinilmiştir. 5. bölümde veriler ve modellerin uygulanması hakkında bilgi verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ortaya konmuş ve öneriler sunulmuştur.

## 2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE TÜRLERİ

Son zamanlarda yöneylem araştırmaları ve matematiksel programlama teknikleri ürünlerin dağıtımında etkin bir rol oynamaktadır. Bilgisayar kullanılarak planlanan dağıtım süreci ile Kuzey Amerika'da ve Avrupa'da birçok gerçek dünya uygulamalarının toplam taşıma maliyetlerinde yaklaşık olarak %5'den %20'ye kadar tasarruf sağladığı görülmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, depo ile müşteriler arasındaki ürünlerin dağıtımıyla ilgili problem olarak bilinen ARP ele alınmıştır. Ürünlerin dağıtımı, bir ya da daha fazla depoda bulunan uygun bir yol ağında araçların müşterilere verilen zaman dilimi içerisinde hizmet sunulması ile ilgilidir. ARP, gezgin satıcı probleminin (GSP) geliştirilmiş biçimidir. ARP, GSP'ye birden fazla araç ve kısıt eklenmesi ile geliştirilmiştir. GSP, polinomsal zamanda çözümü zor olan problem (NP-Hard) türüdür. Aynı şehre veya müşteri noktasına sahip ARP, GSP ile karşılaştırıldığında ARP'nin çözümünün bulunması çok daha zordur. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere ARP'de araçlar bir noktadan başlayarak müşteriye hizmet verdikten sonra yine aynı noktaya dönmek zorundadır. ARP'nin yaygın uygulama alanları; katı atıkların toplanması, sokakların temizlenmesi, okul servis araçlarının rotalanması, engelli kişilerin taşınması, bakım ünitelerinin rotalanmasıdır.



Şekil 2.1. ARP'nin Genel Gösterimi [14].

ARP’de müşterilerin, araçların ve amaç fonksiyonunun özelliklerinin başlangıçta belirlenmesi gerekir.

Müşterilerin genel özellikleri şunları kapsar:

- Yol serimindeki noktalarda müşterilerin bulunması,
- Müşterilerden toplanacak ya da dağıtılacak ürün miktarı (talep),
- Müşterilere hangi zaman aralığında hizmet verileceği (zaman penceresi),
- Yükün müşterilere dağıtımını veya toplanması esnasında geçecek-süre (araç tipine de bağlı olarak yükleme ve boşaltma süresi),
- Müşterilere hizmet verecek araçlar kümesi,

Araçların genel özellikleri şunları kapsar:

- Araçların varış deposunun başlangıç deposundan farklı olması,
- Araçların kapasitesi (aracın yükleyeceği maksimum ağırlık, maksimum hacim, maksimum palet sayısı),
- Araçların alt bölüm olarak kompartmanlara ayrılması, her bir kompartmanın taşıyacağı yük tipi ve kapasitesi,
- Yükleme ve boşaltma işlemleri için mevcut teçhizat,
- Araçların izlediği yol seriminin alt kümesi,
- Araç kullanımı ile ilgili maliyetler (birim mesafeye göre, birim zamana göre, rotaya göre),

Şirket politikalarına ve sürücülerin uymak zorunda oldukları kurallara (bir günlük çalışma süresi, hizmet süresince yemek sayısı ve süresi, aracı maksimum kullanma zamanı, fazla mesai) bağlı kısıtlar genellikle araçla birlikte ele alınmaktadır.

Genel operasyonel kısıtlar şunlardır:

- Mevcut yük, araç kapasitesini aşmamalıdır.
- Müşteriden sadece yük toplanabilir, müşteriye sadece yük dağıtılabilir ya da bunların her ikisi yapılabilir.
- Müşterilere kendi zaman penceresi içinde hizmet verilir.
- Sürücülerin çalışma süreleri araçların müşterileri ziyaret etmeleri ile ilgilidir.

Öncelik kısıtları:

- Rotada ilk ziyaret edilmesi gereken müşteri sırası belirlenebilir (Topladağıt problemlerinde, önce yük toplanır sonra teslim edilecek müşteriye aynı araçla dağıtılır).

Rotaların toplam maliyetlerinin değerlendirmesi ve operasyonel kısıtların kontrolü, her bir müşteri ve müşteri-depo arasındaki seyahat maliyeti, seyahat süresi bilgisini gerektirir. İlgili maliyet ve seyahat süresi matrisleri simetrik veya asimetrik olabilir.

Genel amaçlar şunlardır:

- Seyahat edilen mesafeye, seyahat süresine ve kullanılan araç ile ilgili sabit maliyetlere bağlı olarak taşıma maliyetinin en küçüklenmesi,
- Hizmet verecek araç sayısının en küçüklenmesi,
- Araç yükü ve seyahat süresi için rota dengesi,
- Müşterilere verilen kısmi hizmete bağlı cezaların en küçüklenmesi,
- Yukarıda sayılan amaçların ağırlıklandırılmış birleşimi,

Yukarıda sözü edilen özellikler ARP problemlerinde kullanılan amaç ve kısıtların genel yapısını göstermektedir [14].

ARP ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında tanımlanmıştır [15]. Klasik ARP'ye eklenen yeni kısıtlar yeni ARP türlerini oluşturmaktadır. Daha sonra yapılan çalışmalar ile farklı ARP türleri ve çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

## 2.1. Klasik Araç Rotalama Problemi

Klasik araç rotalama problemi (KARP), araç rotalama probleminin temelini oluşturur. Literatürde en basit ve en çok çalışılan ARP türüdür. Modelde aşağıdaki varsayımlar dikkate alınır.

### Varsayımlar

- Talepler bellidir, bölünemez.
- Araçlar sadece merkezi depoda toplanmıştır.
- Araçlar için kapasite kısıtı uygulanır.
- Amaç, tüm müşterilere hizmet verdikten sonra toplam maliyetin en küçüklenmesidir (rotaların ağırlıklandırılmış fonksiyonu ve onların uzunluğu ya da seyahat süresi).

KARP,  $G(V, A)$  ağ (serim) şeklinde tanımlanır.  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  noktalar kümesi,  $A$  ayrıt kümesini gösterir.  $i = 1, \dots, n$  noktaları müşterileri temsil eder. 0 veya  $n+1$  noktası depoyu temsil eder.  $c_{ij}$  maliyet matrisi,  $arc(i, j) \in A$  ile bağlı olan ve  $i$  noktasından  $j$  noktasına seyahat maliyetlerini temsil eder.  $G$  serimi yönlü ise  $c_{ij}$  maliyet matrisi asimetriktir ve ilgili problem Asimetrik Klasik Araç Rotalama Problemi olarak adlandırılır.  $G$  serimi yönsüz ve maliyet matrisi simetrik ( $c_{ij} = c_{ji} \forall i, j \in A$ ) ise ilgili problem Simetrik Klasik Araç Rotalama Problemi olarak adlandırılır. Simetrik problemde  $A$  ayrıtlar kümesinin yerine  $E$  yönsüz kenar kümesi kullanılır.

En küçük maliyetli  $K$  adet rotanın toplamının bulunması KARP'yi oluşturur.

KARP'de varsayımlar şu şekildedir:

- Her bir rota, depo noktasında başlar ve depo noktasında sonlanır.
- Her müşteri noktası bir rota tarafından ziyaret edilir.
- Her bir rota tarafından ziyaret edilen noktaların talepleri araç kapasitesini aşamaz [14].

Dantzig ve Ramser 1959'da kamyon teslimat problemini ele almışlardır. Problem, petrol yüklü kamyonların terminal noktasından istasyonlara en kısa hangi yolları izleyerek dağıtım yapacağını belirlenmesidir. Problemin çözümü hem el ile hem de hesap makinesi kullanılarak yapılmıştır. Problem aşağıda gösterildiği biçimde ifade edilmiştir.

### **Kümeler**

$P_i$  : İstasyon kümesi

$P_0$  : Terminal kümesi

### **Parametreler**

$d_{ij}$ : Mesafe matrisi

$q_i$  : Teslimat vektörü

$C$  : Kamyon kapasitesi

### **Karar Değişkeni**

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & P_i \text{ ve } P_j \text{ noktaları eşleşiyorsa} \\ 0, & \text{eşleşmiyorsa ve } x_{ii} = 0 \text{ ise} \end{cases}$$

### **Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar**

$$\text{enk } D = \sum_{i,j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in P_i \quad (2.2)$$

$$enb(q_i) < C \quad (2.3)$$

Amaç fonksiyonu (2.1) mesafenin enküçüklenmesidir. Kısıt (2.2) her bir nokta, ya  $P_0$  noktasıyla veya en çok bir  $P_j$  noktasıyla bağlantılı olmalıdır. Kısıt (2.3) en büyük yük kapasitesi, kamyon kapasitesini aşmamalıdır [15].

Clarke ve Wright 1964 yılında Dantzig ve Ramser'in kamyon teslimat problemine farklı bir yaklaşımda bulunarak tasarruf algoritmasını geliştirmişlerdir. Tasarruf algoritması ile en uygun çözüme yakın matematiksel değer hem bilgisayar hem de el ile hesaplanabilmektedir. Şekil 2.2'de tasarruf algoritması görülmektedir. Şekil 2.2'de 0 (sıfır) depo noktasını göstermek üzere, 1. durumdaki amaç fonksiyonu  $f_1$ , 2. durumdaki amaç fonksiyonu ise  $f_2$  olarak ifade edilirse;

$c_{ij}$ :  $i$  noktası ile  $j$  noktası arasındaki mesafe (simetrik)

$s_{ij}$ :  $i$  noktası ile  $j$  noktası arasındaki tasarruf

Şekil 2.2.'de 1. durumun amaç fonksiyonu;

$$f_1 = 2c_{01} + 2c_{02} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Şekil 2.2'de 2. durumun amaç fonksiyonu;

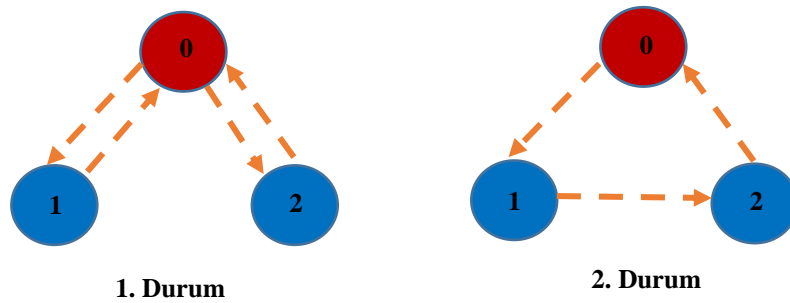
$$f_2 = c_{01} + c_{02} + c_{12} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Tasarruf ise;

$$s_{12} = f_1 - f_2$$

$$s_{12} = 2c_{01} + 2c_{02} - c_{01} - c_{02} - c_{12}$$

$$s_{12} = c_{01} + c_{02} - c_{12} \text{ şeklinde hesaplanmaktadır [16].}$$



Şekil 2.2. Tasarruf Algoritması

Balinski ve Quandt 1964 yılında kamyon teslimat problemine tamsayı programlama yaklaşımını önermişlerdir. Gomory'nin kesme düzlemi algoritması kullanılarak problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, genel olarak serim teorisinde kullanılan genelleştirilmiş kapsama problemlerinin çözümü için kullanılan bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [17].

Fisher ve Jaikumar ARP için genelleştirilmiş atamaya dayanan bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntem literatürde var olan 12 test problemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Önerilen sezgisel 12 test problemi içerisinde 9'unda en iyi çözüm bulmuştur. Ortalama değer olarak ise 12 test problemi içerisinde en düşük ortalama maliyetli çözümü vermiştir [18].

Christofides, Mingozi ve Toth tarafından kapsar ağaç ve en kısa yol gevşetmelerine dayanan ARP için üç kesin çözüm algoritması ortaya konmuştur. İlki *k-merkezli* en kısa kapsar ağaç algoritması, ikincisi *q-rotalı* algoritma, sonuncu ise problemin indirgenme ve baskınlığını içeren algoritmadır. Algoritmalar literatürden türetilen birçok test verisi ile denenmiştir. *Q-rotalı* algoritmadan elde edilen sınırlar, 25 müşterinin üzerindeki ARP'de diğer algoritmalara göre üstün sonuçlar vermiştir [19].

Laporte ve Nobert, KARP için dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Araştırmacılar öncelikle problemin tamsayı programlamaya dayanan matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Daha sonra algoritma ortaya koymuşlardır. Geliştirilen temel algoritmanın Gomory kesme üretimi, alt tur engelleme kısıtları, alternatif dallanma stratejileri olmak üzere üç çeşidi incelenmiştir. Algoritma çeşitli tip ve büyüklükteki problemler için test edilmiş ve 15 ile 50 şehir arasında değişen problemlerde kesin sonuç verdiği görülmüştür [20].

Laporte, Nobert ve Desrochers, ARP için kapasite ve mesafe kısıtlarını içeren tamsayı doğrusal programlama algoritması tanımlamışlardır. Geliştirilen algoritmada kısıt gevşetmeleri ve yeni alt tur engelleme kısıtları kullanılmıştır. Mesafe matrisine bağlı olarak algoritmanın iki farklı versiyonu sunulmuştur. 60 şehirden oluşan problemler için kesin sonuç elde edilmiştir [21].

Baldacci, Hadjiconstantinou ve Mingozi ARP için aracın kapasitesinin dolu ve boş olma durumu gözetilerek çift yönlü yük akışına dayalı tamsayı doğrusal programlama geliştirmişlerdir. Doğrusal programlama gevşetmelerinden yola çıkarak yeni bir alt sınır elde edilmiştir. Elde edilen alt sınır, literatürde var olan alt sınırlar ile karşılaştırıldığında

bulunan alt sınır değerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Yeni dal ve kesme algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma literatürde TSPLIB olarak bilinen test verileriyle denenmiş, 80 müşteri ve 5 araca sahip problem için iyi sonuç vermiştir [22].

Baldacci, Toth ve Vigo ARP’de kullanılan kesin algoritmalaradaki son gelişmeleri ele almıştır. Kesin algoritmalar incelenmiş ve sayısal olarak karılatırılmıtır. Çalışmada ayrıca başlıca KARP modelleri ve çeşitli KARP gevetmeleri incelenmiştir [23].

Goel ve Gruhn, gerçek yaşamda var olan zaman, farklı araç, farklı maliyet, farklı seyahat süreleri gibi çeşitli kısıtları içeren genel araç rotalama problemi üzerinde çalışmıştır. Problemin zm oldukça zor ve birçok çözüm içermesinden dolayı komşuluk arama yapısı kullanılmıştır. Avrupa’nın büyük havaalanları depo olarak kabul edilmiş ve buna dayanarak gerçeğe dayalı veriler üretilmiştir [24].

Shetty, Sudit ve Nagi, insansız savaş hava araç filosunun önceden belirlenen hedefler için stratejik rotalamasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada hedeflerin önceliğe göre sıralanması ve hava aracına mühimmat yüklenmesi esas alınmıştır. Problem, hedef atama problemi ve araç rotalama problemi olmak üzere iki kapsamlı olarak ele alınmıştır. Çalışmada tabu arama sezgisel yaklaşımı kullanılmış olup Solomon veri kümesi ile test edilmiştir [25].

Laporte yaptığı literatür tarama çalışmasında dal-sınır algoritmaları, dinamik programlama, araç akış formülleri ve algoritmaları, yk akış formülleri ve algoritmaları, küme bölütleme formülleri ve algoritmalarını içeren kesin çözüm algoritmaları, tasarruf algoritması, küme bölütleme sezgiselleri, birinci-küme ve ikinci-rota sezgiselleri, gelimi sezgiseller gibi sezgisel yöntemler ve yerel arama, popülasyon arama ve öğrenme mekanizmalarına dayanan metasezgisel yöntemlerdeki gelişmeleri incelemiştir [26].

Bektaş ve Laporte, klasik araç rotalama probleminin geniletilmi bir Őekli olan kirlilik rotalama problemi için model oluşturmuştur. Çalışmada amaç, sadece mesafenin kısaltılması değil aynı zamanda sera gazı salınımının, yakıtın, seyahat zamanı ve maliyetlerinin en küçüklenmesi olarak ele alınmıştır. Model İngiltere’de uygulanmış ve gerçeğe yakın veri kümesi kullanılarak test edilmiştir [27].

Derigs, Kurowski ve Vogel hava kargoyu destekleyen yol araçları (traktör ve römorklar) için araç rotalama problemini çözen iki çözüm algoritması geliirmitir. Çalışma, Georgi Transporte firmasına ait gerçek veri kümesi kullanılarak test edilmiştir [28].

Subramanian, Uchoa ve Ochi, ARP için büyük ölçekli problemleri dinamik olarak kontrol edebilen hibrit bir algoritma geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma kapasiteli, asimetric, anlık topla-dağıt, karışık topla-dağıt gibi araç rotalama problemlerinde kullanılarak daha önceki sezgisel algoritmalarla karşılaştırılmış ve iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Çalışmada kapasiteli araç rotalama için Christofides, asimetric için Fischetti, açık uçlu araç rotalama için Li, eşzamanlı dağıt-topla ARP için Salhi, karışık topla-dağıt için Salhi, çoklu depolu için Cordeau, çoklu depolu karışık topla-dağıt için Salhi 'nin verileri kullanılmıştır [29].

## 2.2. Heterojen Filolu Araç Rotalama Problemi

Heterojen filolu araç rotalama problemi (HFARP) kavramı, 1959'da Kirby'nin yapmış olduğu çalışma ile ilk defa ortaya koyulmuştur [30]. HFARP, farklı kapasitelere sahip araç filosu kullanılarak belirli bir müşteri kümesinin taleplerini en az maliyetle karşılama problemidir. KARP'nin bütün özelliklerini taşımaktadır. Hem KARP'de hem de HFARP'de aşağıdaki kısıtlar sağlanmalıdır:

- Her bir müşteriye sadece bir araçla ve bir defa hizmet verilmelidir.
- Her bir aracın rotası, depo noktasında başlayıp müşteri veya müşterilere hizmet verdikten sonra tekrar depo noktasında son bulmalıdır.
- Bir rotada müşterilerin toplam talebi o rotaya atanan aracın kapasitesini aşmamalıdır.

KARP'de aynı kapasiteye sahip belirli tip araçlar bulunurken, HFARP'de ise farklı kapasitelere sahip araçlar bulunmaktadır. Bu yüzden kullanılan aracın sabit maliyeti hesaba katılmak zorundadır.

Gheysens, Golden ve Assad, yük akışına dayalı akış tabanlı matematiksel model geliştirmiştir. Çalışmada literatürde mevcut tasarruf algoritması, ilk-rotalama ve ikinci-sınıflama gibi sezgisel yöntemler incelenmiştir. Ceza maliyetine dayanan yaklaşım önerilmiştir. Ayrıca yeni bir sezgisel yöntem geliştirilmiş ve test verileriyle denendiğinde iyi sonuç ortaya koyduğu görülmüştür [31].

Taillard, HFARP için sezgisel bir yöntem olan kolon üretme yöntemi geliştirmiştir. Sezgiselin, 50 ve 100 nokta arasında değişen test verileriyle denendiğinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [32].

Gendreau vd. HFARP için yasaklı arama algoritması geliştirmiştir. Algoritma, GSP için geliştirilen genelleştirilmiş ekleme sezgiseli ve uyarlamalı hafıza prosedürü gibi

algoritmanın kendi içerisine gömülen çeşitli stratejiler içermektedir. Algoritma Golden tarafından geliştirilen 12 test verisi ve Taillard tarafından geliştirilen 8 test verisi kullanılarak denenmiştir. Geliştirilen algoritmanın iyi sonuç verdiği görülmüştür [33].

Renaud ve Boctor filo boyutlandırma ve heterojen araç rotalama problemi için süpürme tabanlı algoritma uygulamıştır. Söz konusu algoritma daha önce geliştirilen tabu arama algoritması ile karşılaştırılmış ve yeni geliştirilen algoritmanın daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Golden vd.'nin sezgisel olarak 20 test probleminden elde ettiği veri kümesi kullanılmıştır [34].

Baldacci, Battara ve Vigo literatürdeki HFARP tiplerini incelemiştir. HFARP için önerilen alt sınır ve sezgisel algoritmalar gözden geçirilmiştir. Literatürdeki farklı sezgisel algoritmaların test verileriyle olan karşılaştırmaları ortaya koyulmuştur [35].

Azimi ve Salari heterojen sabit filolu araç rotalama problemi için model ve mevcut çözüm yaklaşımlarını tamamlayıcı sezgisel çözüm önermiştir. Test için Taillard'ın geliştirdiği veri kümesi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, önerilen çözüm yönteminin etkili olduğunu ortaya koymuştur [36].

Koç vd. HFARP sınıflandırılması ve incelenmesi amacıyla bir çalışma yapmıştır. Bunun yanında çalışmada HFARP ile ilgili geliştirilen metasezgisel algoritmalar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır [37].

### 2.3. Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

Zaman pencereci araç rotalama problemi (ZPARP), KARP'nin genişletilmiş bir türüdür. Her  $i$  müşterisi için zaman penceresi adı verilen  $[a_i, b_i]$  zaman aralığı kullanılır. Yine her bir  $i$  müşterisi için araçların depodan ayrılma anları, seyahat süresi  $t_{ij}$ , ilave hizmet süresi (servis süresi-bekleme süresi)  $s_i$  verilir. Sıfır anında tüm araçların depodan ayrıldıkları varsayılır. Orijinal matris simetrik olsa bile rotaların zaman penceresi ile tam uyumlu olması gerekir. Bu yüzden genellikle ZPARP asimetric problem olarak modellenir.

ZPARP;

- Her rotanın depo noktasını ziyaret ettiği,
- Her müşteri noktasının bir rota tarafından ziyaret edildiği,
- Rotalar tarafından ziyaret edilen noktaların toplam talep miktarlarının araç kapasitesini aşmadığı,

- Her bir  $i$  müşterisine  $s_i$  bekleme süresi kadar  $[a_i, b_i]$  zaman penceresi aralığında hizmet verildiği,

en küçük maliyetli tüm  $K$  basit rotalarının toplamının bulunmasından meydana gelir.

ZPARP, zaman pencerelerine göre ikiye ayrılır. Kesin zaman pencereli (Hard time windows) ARP'de araç, hizmet verme zamanından önce müşteri noktasına ulaşmışsa en erken hizmet vereceği zamana kadar beklemek zorundadır. Eğer araç, hizmet verme zamanından sonra müşteri noktasına gelmiş ise müşteriye hizmet veremez. Esnek zaman pencereli (Soft time windows) ARP'de araç, hizmet verme zamanından önce müşteri noktasına ulaşmışsa en erken hizmet vereceği zamana kadar beklemek zorundadır. Eğer araç, hizmet verme zamanından sonra müşteri noktasına ulaşmışsa müşteriye hizmet vermeye belirli bir ceza maliyeti karşılığında başlar [38].

ZPARP,  $\forall i \in V \setminus 0$  ve  $a_i = 0, b_i = +\infty$  olduğu durumda araç rotalama probleminin genelleştirilmiş hali olan KARP'yi verir.  $C \geq d(V)$ ,  $K = 1$  olduğunda ZPARP'nin özel bir durumu olan Zaman Pencereli Gezgin Satıcı Problemi (ZPGSP) elde edilir [14, 39].

Knight ve Hofer, Londra'da 40 araçlık bir firmaya ait zamana ve çağırılma durumuna göre çizelgeleme problemi üzerine çalışmıştır. Yapılan çalışma ile firmanın yaklaşık olarak %12 tasarruf etmesi sağlanmıştır [40].

Savelsbergh, ZPARP için  $k$ -değişim kavramına dayanan yerel arama algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma, Smith ve Thompson'un GSP için oluşturduğu test veri kümesi ile denenmiştir. Sezgiselin sonuçlarının tatmin edici olduğu görülmüştür [41].

Solomon, zaman pencereli çizelgeleme ve ARP için sezgisel algoritmaları incelemiştir. İncelenen sezgiseller: tasarruf sezgiselleri, zaman odaklı en yakın komşuluk sezgiseli, ekleme sezgiseli ve zaman odaklı süpürme sezgiselidir. Bu sezgisel yöntemler Solomon'un geliştirdiği test veri kümesi ile test edilmiştir. Ekleme sezgiselinin diğer sezgisel yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [42].

Savelsbergh, ZPARP için kenar değişim yöntemine dayalı uygulama geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem rassal olarak üretilmiş olan test veri kümesi ile denenmiştir. CPU süresi arttırıldığında yöntem iyi sonuç vermiştir [43].

Desrochers, Desrosiers ve Solomon tarafından ZPARP için sütun oluşturmaya dayanan bir algoritma geliştirmiştir. Uygun kolonlar dinamik programlama, kapasite kısıtları ve zaman pencereli en kısa yol problemi çözülerek elde edilmiştir. Geliştirilen

algoritma Solomon veri kümesi ile test edilmiştir. Algoritmanın iyi sonuç verdiği görülmüştür [44].

Taniguchi ve Shimamoto, gerçek seyahat zaman bilgisini taşıyan dinamik araç çizelgeleme ve rotalama modeli geliştirmiştir. Söz konusu çalışmada araştırmacıların ürettiği test verisi kullanılmıştır. Buna göre modelin maliyeti ve trafik yoğunluğunu azaltarak iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür [45].

Hsu, Hung ve Li, bozulabilir yiyecek teslimi için olasılıksal ZPARP üzerine çalışmıştır. Çalışmada sabit maliyetlerin en küçüklenmesinin yanı sıra stok maliyeti, enerji maliyeti, ceza maliyetleri ve zaman penceresinin kullanıldığı matematiksel model geliştirilmiş ve çözülmüştür. Veriler Çin Fen Bilimleri Meclisi Projeleri kapsamında temin edilmiştir [46].

Tang vd., belirsiz zaman aralıklı araç rotalama problemini ele almıştır. Söz konusu çalışmada çok amaçlı matematiksel model geliştirilmiştir. Problem iki alt model olarak ele alınarak çözülmüştür. Amaçlardan biri seyahat süresini en küçüklemek diğeri ise müşteriye sunulacak hizmet süresini en büyükmektir. Pareto çözümü elde edebilmek için iki aşamalı algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma Solomon veri kümesi kullanılarak test edilmiştir [47].

Kritikos ve Ioannou, dengeli kargo yük dağılımlı araç rotalama problemi için matematiksel model geliştirmiştir. Modelin çözümü için veri zarflama analiz yöntemine dayalı yaklaşım önerilmiştir. Söz konusu model ve yaklaşım Ioannou'nun ortaya koyduğu veri kümesi kullanılarak test edilmiştir [48].

Qureshi, Taniguchi ve Yamada, yarı esnek ZPARP için model kurmuş ve çalışmada genetik algoritmaya dayanan sezgisel kullanılarak tam çözüme ulaşılmıştır. Yarı yumuşak zamanlıdan kasıt zamanından önce ve sonra yapılan teslimatlarda ceza maliyetinin uygulanmasıdır. Çalışmada Solomon veri kümesi kullanılarak büyük ölçekli problemlerde maliyet ve hesaplama zamanı bakımından iyi sonuç elde edilmiştir [49].

Repoussis ve Tarantilis tarafından zaman pencereli heterojen ve filo boyutlu araç rotalama problemi için yarı sezgisel yapıda olan uyarlamalı hafıza programlama çözüm yaklaşımı tabu arama algoritmasının kısa dönemli hafıza yapısı kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı uygun filo boyutunun ve maliyetin belirlenmesidir. Geliştirilen çözüm yöntemi, Solomon tarafından türetilen, Liu ve Shen tarafından önerilen veri kümesi kullanılarak test edilmiştir. Çözüm yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkili sonuçlar verdiği ifade edilmiştir [50].

## 2.4. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi

Depo dışında kalan diğer noktaların  $V \setminus \{0\}$ , iki alt kümeye ayrıldığı KARP'nin genişletilmiş bir türüdür. İlk alt küme  $L$  (Linehaul) olarak ifade edilen uğranılan ve ürünlerin teslim edilmesi yani dağıtımın yapılması gereken müşteri kümesidir. İkinci alt küme ise ürünlerin alınması ya da toplama yapılması gereken  $B$  (Backhaul) olarak ifade edilen müşteri kümesidir. Müşteri kümeleri  $L = \{1, \dots, n\}$  ve  $B = \{n + 1, \dots, n + m\}$  olarak gösterilir.

Önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi (ÖDSTARP)'nde hem dağıtım işleminin yapıldığı hem de toplama işleminin yapıldığı müşteriler arasında öncelik kısıtları mevcuttur. Eğer bir rota üzerinde her iki müşteri tipi bulunuyorsa toplama yapılacak müşterilerden önce dağıtımın yapılacağı müşterilere hizmet verilir. Her bir  $i$  müşterisine dağıtılacak ya da toplanacak negatif olmayan talep  $d_i$  vardır ve deponun talebinin sıfır  $d_0 = 0$  olduğu varsayılmaktadır. Maliyet matrisi asimetrik ise Asimetrik ÖDSTARP (AÖDSTARP) olarak adlandırılır.

ÖDSTARP;

- Her rotanın depo noktasını ziyaret ettiği,
- Her müşteri noktasının bir rota tarafından ziyaret edildiği,
- Bir rota tarafından ziyaret edilen dağıtımın yapıldığı müşteriler ve toplamanın yapıldığı müşterilerin toplam talep miktarlarının ayrı ayrı araç kapasitesini aşmadığı,
- Her bir rotada dağıtımın yapıldığı müşterilerin, toplama işleminin yapıldığı müşterilere göre öncelikli olduğu,

en küçük maliyetli tüm  $K$  basit rotalarının toplamının bulunmasından meydana gelir.

Rotada sadece toplama işleminin yapıldığı müşterilere izin verilmez. Dahası öncüllük kısıtları ile hem dağıtımın hem de toplama işleminin yapılmasına olanak sağlanır. KARP'deki gibi dağıtım ve toplama işlemlerinin her biri için ihtiyaç duyulan minimum araç sayısı  $K_L$  ve  $K_B$  Kutu Paketleme probleminde hesaplandığı şekliyle bulunur. Uyumluluk açısından  $K$  araç sayısı, müşterilere hizmet veren minimum araç sayısından küçük olamaz. Genellikle araç sayısı dağıtımda ve toplama işleminde ihtiyaç duyulan araç sayısının en büyüğü  $K \geq \text{enb}\{K_L, K_B\}$  olarak alınır.

ÖDSTARP ve AÖTSDARP çözümü zor olan problem tiplerindedir. Toplama işleminin yapıldığı müşteri kümesi boş küme  $B = \emptyset$  olarak düşünüldüğünde temel araç rotalama türlerinden olan SKARP ve AKARP'ye genelleştirilebilirler. Dahası  $C \geq \text{enb}\{d_L, d_B\}$  ve  $K = 1$  olarak alındığında ÖDSTARP'nin özel bir durumu olan Önce Dağıt Sonra Topla Gezgin Satıcı Problemini (ÖDSTGSP) elde etmiş oluruz. Literatürde ÖDSTARP'nin zaman pencereli türleri de mevcuttur [14].

Toth ve Vigo, ÖDSTARP için tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Alt sınır için kesme düzlemine dayanan Lagrange alt sınır değeri hesaplanmıştır. Çalışmada ÖDSTARP için kesin çözüm yöntemlerinden olan dal ve sınır algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma Goetschalckx ve Jacops-Blecha tarafından önerilen simetrik ve asimetrik 100 noktadan oluşan veri kümesi ile denenmiştir. Dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir [51].

Toth ve Vigo, hem simetrik hem de asimetrik ÖDSTARP probleminin çözümü için önce kümele sonra rotala sezgiseline dayalı algoritma geliştirmişler. Alt sınır için daha önce önerilmiş olan Lagrange gevşetmesinde elde edilen alt sınır kullanılmıştır. Sezgisel algoritma, Goetschalckx ve Jacops-Blecha'nın önerdiği 60 noktalı veri kümesi ile denenmiştir. Simetrik ve asimetrik durumlar için algoritmanın etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [52].

Mingozi, Giorgi ve Baldacci ÖDSTARP için tamsayılı programlama modeli ve kesin çözüme dayanan sezgisel algoritma geliştirmiştir. Problem, Goetschalckx ve Jacops-Blecha ve Toth, Vigo 'nun önerdikleri test veri kümeleri kullanılarak çözülmüştür. 100 müşterinin üzerindeki problemlerde algoritmanın iyi sonuç verdiği görülmüştür [53].

Dethloff karışık ÖDSTARP ile eş zamanlı dağıt-topla araç rotalama problemi (EZDTARP) arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Ekleme sezgiseline dayanan çalışma ile karışık ÖDSTARP'de aracın boş kısmı ile EZDTARP araştırılmıştır. Geliştirilen sezgisel Christofides vd. ve Salhi vd. tarafından önerilen test veri kümesi ile denenmiştir. Dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir [54].

Klasik ÖDSTARP'de taleplerin dağıtılacağı müşteri kümesine hizmet verilmeden toplama yapılacak müşterilere hizmet verilememektedir. Diğer yandan Wade ve Salhi, dağıtım yapılmadan da karışık bir şekilde toplamanın yapılacağı müşteri kümesine hizmet verilebileceği ÖDSTARP problemi için ekleme sezgiseli önermiştir. Sezgisel Goetschalckx ve Jacops-Blecha'nın önerdiği veri kümesi ile test edilmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir [55].

Crispim ve Brandao, komşuluk değer indirgeme ve yasaklı arama algoritmalarından oluşan hibrit metasezgisel algoritma geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma ile ÖDSTARP'nin karışık ve anlık dağıtım-toplama talepli olan problem türlerine uygulanmıştır. Algoritma, literatürde Salhi ve Nagy'nin önerdiği Öklid veri kümesinden oluşan test verileriyle test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde olan sonuçlarla karşılaştırıldığında büyük oranda tasarruf sağlandığı görülmüştür [56].

Keçeci, akış tabanlı ve düğüm tabanlı olmak üzere iki tamsayılı karar modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modeller Goetschalckx'ın literatürdeki veri kümesi ile test edilmiştir. Modellerin farkları ortaya konmuştur [57].

## 2.5. Eş Zamanlı Dağıt-Topla Araç Rotalama Problemi

EZDTARP'de her müşteri, sırasıyla dağıtılan ve toplanan homojen yük talebini gösteren  $d_i$  ve  $p_i$  ile ilişkilidir.  $d_i$  ve  $p_i$  bir tek talep niceliği ile gösterilebilir. Tek talep niceliği  $d_i = d_i - p_i$  şeklinde gösterildiğinde net talep miktarı, dağıtılan ve toplanan talep miktarları arasındaki farka eşit olmaktadır. Bu yüzden talebin negatif çıkma olasılığı da vardır. Her bir müşteri için önce dağıtımın yapıldığı, sonra toplamanın gerçekleştiği varsayılır. Bu yüzden gelen bir müşteriden aracın ayrılmadan önceki yükü, dağıtılan taleplerin başlangıç yükünden çıkarılması ve toplanacak miktarın kalan yüke eklenmesiyle elde edilir.

EZDTARP;

- Her rotanın depo noktasını ziyaret ettiği,
- Her müşteri noktasının bir rota tarafından ziyaret edildiği,
- Bir rota tarafından ziyaret edilen dağıtımın yapıldığı ve toplamanın yapıldığı müşterilerin toplam talep miktarlarının araç kapasitesini aşmadığı,
- Her bir rotada  $i$  depodan farklı olduğunda,  $O_i$  müşterisine,  $D_i$  müşterisinden önce hizmet verildiği,

en küçük maliyetli tüm  $K$  basit çevrimlerinin toplamının bulunmasından meydana gelir. EZDTARP çözülmesi zor problem tiplerindedir. Çünkü  $p_i = 0$  olarak alındığında KARP elde edilir. Dahası  $K = 1$  olarak alındığında EZDTARP'nin özel bir durumu olan Eş Zamanlı Dağıt-Topla Gezgin Satıcı Problemi (EZDTGSP) elde edilir [14].

EZDTARP ilk olarak Min tarafından ortaya atılmıştır [58]. Daha sonra Anily, Mosheiov ve Dethloff çalışmalarıyla EZDTARP'ye katkıda bulunmuşlardır [59-61].

Vidović, Radivojević ve Raković, iki farklı ağırlıkta boş ya da dolu konteynırların yüklenip dağıtılmasını ve toplanmasını amaçlayan araç rotalama problemi için model geliştirmiştir. Çalışmada modelin çözümü için sezgisel yaklaşım önerilmiş olup model gerçeğe yakın veri kümesi kullanılarak test edilmiştir [62].

Çetin ve Gencer, heterojen araç filolu eşzamanlı dağıtım toplamalı araç rotalama problemi için sezgisel bir algoritma önermiş ve önerilen algoritmaya dayalı bir karar destek sistemi geliştirmiştir. Çalışmada veri kümesi olarak karayolunda taşımacılık yapan bir firmanın altı haftalık verileri kullanılmıştır. Önerilen sezgisel algoritmaya uygun literatürde karşılaştırma yapacak bir algoritma bulunamadığı için mevcut durumla karşılaştırılmış ve mevcut durumdan daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir [63].

Atmaca, bir kargo şirketi için eşzamanlı dağıtım ve toplamalı araç rotalama probleminin çözümünü hedeflemiştir. Problem, bir kargo şirketinin Ankara içi ve çevresindeki 71 şubeye kargo dağıtımını ve toplanmasında araç kapasitesini aşmayacak şekilde toplam mesafeyi en küçükleyecek rotaların belirlenmesidir. Geliştirilen matematiksel modelin çözümü GAMS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç mevcut durumla karşılaştırıldığında önemli ölçüde iyileşme sağlandığı görülmüştür [64].

Schittekat vd. okul otobüsü rotalaması için durak seçiminin yapıldığı bir model önermiştir. Açgözlü ve komşuluk arama metasezgisel yaklaşım yöntemleri kullanılarak problemin uygun çözümü bulunmuştur. Test veri kümesi için gerçeğe yakın 112 yapay durum üretilerek elde edilmiştir [65].

## **2.6. Dinamik Araç Rotalama Problemi**

Dinamik Araç Rotalama Problemi (DARP), algoritmanın çözümü esnasında verinin değişkenlik gösterdiği ARP türüdür. ARP'de algoritmanın çözümü esnasında verinin gelişimi statiktir. Araç bir rotaya başladığında müşterinin talebindeki değişme ya da yolda aracın arızalanması gibi durumlar dinamikliğe örnek olarak gösterilebilir [66].

Bertsimas ve van Ryzin, dinamik ve stokastik ARP için matematiksel model önerisinde bulunmuştur. Matematiksel modelde trafik ışıklarının alt sınırı ve trafik sıkışıklığı alt sınırı gibi faktörler dikkate alınmıştır [67].

Haghani ve Jung, zamana bağlı seyahat süreli DARP için matematiksel model geliştirmiştir. Matematiksel modelin çözümü için genetik algoritma önerilmiştir. Problem rassal olarak üretilen test veri kümesi ile değerlendirilmiştir. 10 ve üzeri talep noktası için

genetik algoritma, kesin çözüm yöntemleriyle aynı sonucu vermiştir. Fakat süre dikkate alındığında genetik algoritma %10 daha kısa bir sürede çözüm bulmuştur. 30 talep noktası ele alındığında ise genetik algoritma %8 oranında daha düşük bir alt sınır elde etmiştir [68].

Azadian, Murat ve Chinnam hava kargo için gerçek zaman gecikmeleri ve seyahat sürelerini içeren maliyetin en küçüklenmesini amaçlayan dinamik rotalama üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada kullanılan veriler Amerika Ulaştırma Bakanlığı'ndan temin edilmiştir [69].

## **2.7. Stokastik Araç Rotalama Problemi**

ARP'nin bazı elemanlarının rassal olduğu problemler Stokastik Araç Rotalama Problemi (SARP) olarak adlandırılır. Talep, seyahat süresi, servis süresi gibi giriş verilerinin bir kısmının belirsizliğinde stokastik durumdan söz edilebilir [66,70].

Bertsimas, Chervi ve Peterson, SARP için hesaplamaya dayalı yaklaşım önermişlerdir. Problemin çözümü serim tabanlı sezgisel yöntemle gerçekleştirilmiştir. 50 müşteriden oluşan 10 farklı problem için çözüm bulunmuştur. Talepler 0,1-0,9 arasında değişen rassal olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçların daha iyi çözüm verdiği görülmüştür [71].

## **2.8. Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi**

Müşteri talebinin bölünerek birden fazla araç tarafından karşılandığı araç rotalama problemi, bölünebilir talepli araç rotalama problemi (BTARP) olarak adlandırılmaktadır. Bütün müşterilerin taleplerinin bölünmesine gerek yoktur. Problemin bölünebilir talepli olabilmesi için en az bir müşterinin talebinin bölünerek karşılanması yeterlidir. KARP'nin bütün özelliklerini taşır. BTARP ilk kez 1989 yılında Dror ve Trudeau tarafından öne sürülmüştür [72].

## **2.9. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi**

Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AUARP), belirli bir depodan başlayıp müşterilerine hizmet veren araçların tekrar depoya dönmedikleri ve en son hizmet noktasında kaldıkları araç rotalama problemi tipidir. KARP'nin özelliklerini taşır, ancak araçlar depoya dönmez ve rota en son olarak bir müşteri noktasında sonlanır. Depo

noktasına dönülecek olursa yine ziyaret edilen müşteriler tersten ziyaret edilerek depoya dönülür. AUARP’de belirli bir depo noktası ve müşteri kümesi vardır. Müşterilerin talepleri bellidir. Belirli kapasiteye sahip araç filosu depoda bulunur. Depo ile müşteriler arasındaki ve müşterilerin kendi aralarındaki seyahat maliyeti (mesafe, zaman vb.) bilinmektedir.

AUARP;

- Her rotanın depoda başlayıp ve bir müşteri noktasında sonlandığı,
- Her bir müşteriye bir araç tarafından sadece bir defa hizmet verildiği, müşterilerin tüm talebinin karşılandığı ve talebin bölünemediği,
- Her rotada ziyaret edilen müşterilerin talepleri toplamının rotaya atanan aracın kapasitesinden küçük veya aracın kapasitesine eşit olduğu, bir başka deyişle araç kapasite kısıtının aşılamadığı,

müşteri noktalarına hizmet verecek gerekli olan minimum araç sayısı ya da toplam seyahat maliyetini en küçükleyecek uygun rotaların bulunması problemidir [73].

Genellikle AUARP’ye dağıtım için araç filosuna sahip olmayan veya araç filosunun yetersiz kaldığı ve araç filosunun uygun olmadığı firmalarda rastlanır. Böyle bir durumda firma, taşıma işi yapan firmalarla dağıtım, toplama veya her ikisi için anlaşma yapar. Araçları kiralama yoluna gider ve böylece araçların bakım maliyetinden kurtulur. Sadece dağıtım yapılacak ise araçlar depoya geri dönmez. Sadece toplama yapıldığında araçların başlangıç noktası müşteriler, bitiş noktası ise depo olur. Önce dağıtımın sonra toplamanın yapıldığı durumda ise; araçlar, önce dağıtım işini yapar ve yine dağıtım yapılan müşteri sırasını tersten izleyerek toplama yapıldıktan sonra depoya döner. Toplam maliyet, seyahat mesafesinin uzunluğuna ve toplam araç sayısına göre değişir. AUARP’ye otobüs, tren ve uçak taşımacılığında sıklıkla rastlanmaktadır [74]. AUARP ilk olarak Schrage’ın havayolu kargo taşımacılığı alanında yapmış olduğu çalışma ile literatüre girmiştir [75]. Daha sonrasında ise Sariklis ve Powell’ın çalışmaları probleme büyük katkı sağlamıştır [76].

## 2.10. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi

Lojistik firmaları genellikle, değişik türde araçlar kullanırlar ve ambar ya da depo olarak ifade edilen birden çok dağıtım merkezi işletirler. Bu durumda birden fazla deponun kullanılarak müşterilerin talebinin karşılanması gerekir. Bu tür problemler Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇDARP) olarak bilinmektedir. KARP'nin bütün özelliklerini taşır. Aralarındaki fark çok deponun kullanılmasıdır. Çok depo olması durumunda müşteriler en yakın depoya atanmayabilir [77].

ÇDARP'de;

- Bütün müşteri noktalarına hizmet verilmelidir.
- Her bir müşteri noktası sadece bir araç tarafından ziyaret edilmelidir.
- Her rota bir depodan başlamalı yine aynı depoda sonlanmalıdır.
- Her rotada hizmet verilen müşterilerin talepleri toplamı o rotaya atanan aracın kapasitesini aşmamalıdır.

Amaç yukarıdaki şartları sağlayan, toplam rotalama maliyetleri ile araçların sabit maliyetlerinin toplamını en küçükleme [78].

Laporte, Nobert ve Taillefer kapasite ve maliyet kısıtları altında asimetrik ÇDARP için dal ve sınır ağaçlarına dayanan algoritma geliştirmiştir. Çalışmada Carpenato ve Toth'un önerdiği dal-sınır algoritması geliştirilerek yeni algoritma elde edilmiştir. Elde edilen algoritma rassal olarak üretilen veri kümesi ile denenmiştir. Algoritma 80 düğümünden oluşan problemi rahatlıkla çözmüştür [79].

Renaud, Laporte ve Boctor coğrafi olarak ulaşılması zor müşteri kümesine farklı depolardan talebin karşılanmasına yönelik bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Kapasite ve rota uzunluğu kısıtları altında geliştirilen yasaklı arama algoritması, Christofides, Eilon ve Gillet, Johnson tarafından tanımlı 11 test problemi ve Chao tarafından tanımlı 12 yeni test problemi olmak üzere toplam 23 test veri kümesi ile denenmiştir. Algoritma, 20 test probleminde en iyi sonucu elde etmiştir [80].

Hadjiconstantinou ve Baldacci hizmet sektöründeki firmaların kaynak planlama problemi için sezgisel bir algoritma önermiştir. Problem, belirli zaman dilimlerinde bakım hizmeti için müşterilere uğrayacak ekiplerin rotalama maliyetlerinin ve hizmet maliyetlerinin en küçükleme problemidir. Problemin çözümü için sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, 9 depo ve 162 müşteri noktası için farklı senaryolar üretilerek test edilmiştir [81].

Aksoy ve Kapanoğlu, Türk Hava Kuvvetleri'nde mevcut kargo uçakları ile personel ve parçaların talep edilen üslere taşınması probleminin çözümünü hedeflemiştir. Modelde bütün taleplerin karşılandığı en küçük maliyetli rotanın bulunması amaçlanmıştır. Model Türk Hava Kuvvetleri'nden elde edilen veriler ile test edilmiştir [82].

Literatür incelendiğinde özellikle ARP konusunda daha çok karayolu taşımacılığına yönelik çalışmaların yapıldığı dikkati çekmektedir. Diğer taşıma türleri ve özellikle havayolu yük taşımacılığı konusunda sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bunun yanında birden fazla taşıma türü ve farklı araç tiplerinin kullanıldığı, sıkı zaman pencereli çok depolu araç rotalama problemi konularında ise neredeyse yok denecek kadar az sayıda çalışma olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan literatür taraması ile çalışmada ele alınacak problemin çok Depolu Heterojen Filolu (Sıkı) Zaman Pencereli Araç Rotalama Problem (ÇDHFZPARP) tipine yakın olduğu belirlenmiştir.

### 3. LİTERATÜRDE İNCELENEN MATEMATİKSEL MODELLER

#### 3.1. KARP Matematiksel Modelleri

İncelenen bazı KARP Modelleri şu şekildedir:

- Toth ve Vigo'nun (2002) geliştirdiği Asimetrik KARP Modeli [14].
- Fisher ve Jaikumar'ın (1981) geliştirdiği Üç İndisli KARP Modeli (Asimetrik) [18].
- Laporte ve Nobert'in (1983) geliştirdiği Simetrik KARP Modeli [20].
- Baldacci, Hadjiconstantinou ve Mingozzi'nin (2004) geliştirdiği KARP (Simetrik) için Yük Akış Modeli [22].

##### 3.1.1. Asimetrik KARP matematiksel modeli

Asimetrik klasik araç rotalama probleminde  $c_{ij}$  maliyet matrisi asimetriktir. Bu bölümde Toth ve Vigo (2002)'nin önerdiği Asimetrik KARP modeli incelenmiştir [14].

##### İndisler ve Kümeler

$V$ : Depo dâhil tüm noktalar kümesi (0 noktası depo noktasıdır)  $i, j \in V$

##### Parametreler

$c_{ij}$ : Maliyet matrisi (Mesafe)

$C$ : Araç Kapasitesi

$d_j$ : Talep vektörü

$K$ : Kullanılabilecek minimum araç sayısı (Kutu paketleme problemindeki gibi bulunur.)

$$K = \left( \sum_{i \in V \setminus \{0\}} d_i \right) / C$$

##### Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{araç } i \text{ noktasından } j \text{ noktasına giderse} \\ 0, & \text{gitmezse} \end{cases}$$

$u_i$ : Yardımcı karar değişkeni

##### Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad i \neq j \quad (3.1)$$

### Kısıtlar

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} \leq K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = \sum_{i \in V} x_{i0} \quad (3.5)$$

$$u_i - u_j + Cx_{ij} \leq C - d_j \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j, d_i + d_j \leq C \quad (3.6)$$

$$d_i \leq u_i \leq C \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

Amaç fonksiyonu (3.1)'de amaç, toplam seyahat maliyetinin (mesafe) en küçüklenmesidir. Kısıt (3.2) ile her müşteriye bir araç ile bir defa gelinmesi sağlanır. Kısıt (3.3) ile her müşteriden bir araç ile bir defa çıkılması sağlanır (Müşteri noktasından çıkış kısıtları). Kısıt (3.4), depoya en fazla  $K$  sayıda araç ile gelinmesini sağlayan kısıttır (Depoya giriş kısıtı). Kısıt (3.5), depodan kaç araç ile çıkılmışsa o sayıda aracın depoya dönmesini sağlayan kısıttır (Araç akış denge kısıtı). Kısıt (3.6) Miller-Tucker-Zemlin alt tur engelleme kısıtıdır (MTZ Alt tur engelleme kısıtı) [83].

### 3.1.2. Üç indisli KARP matematiksel modeli

Üç indisli KARP modeli ilk defa Fisher ve Jaikumar (1981) tarafından ortaya konmuştur. Aynı tip araçların kullanıldığı problemlerde hangi aracın hangi noktaya uğradığı bilinmemektedir. Rotaya belirli bir aracın tahsis edilmesi istendiğinde iki indisli modelin kullanılması uygun değildir. Bu durumda üç indisli matematiksel model kullanılmaktadır. Geliştirilen bu matematiksel modelin, HFARP modeline alt yapı oluşturduğu ifade edilmektedir [18].

#### İndisler ve Kümeler

$V$ : Depo dahil tüm noktalar kümesi (0 noktası depo noktasıdır)  $i, j \in V$

$k$ :  $1, \dots, K$  - Araçlar Kümesi

## Parametreler

$c_{ij}$ : Maliyet matrisi (Mesafe)

$C$ : Araç Kapasitesi

$d_j$ : Talep vektörü

$K$ : Kullanılabilecek araç sayısı

## Karar Değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & k \text{ aracı } i - j \text{ ayrımını izlerse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ noktasına } k \text{ aracıyla hizmet verilirse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

## Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \quad (3.7)$$

## Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.8)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} \leq K \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in V} d_i y_{ik} \leq C \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijk} \geq y_{hk} \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, h \in S, k = 1, \dots, K \quad (3.12)$$

Amaç fonksiyonu (3.7)'de amaç, toplam maliyetin (mesafe) en küçüklenmesidir. Kısıt (3.8) ile her bir müşteriye bir araçla bir defa hizmet verilmesi sağlanır. Kısıt (3.9), depodan en fazla  $K$  sayıda aracın ayrılmasını sağlar. Kısıt (3.10) her bir müşteri noktasına aynı araçla gelinip aynı araçla çıkılmasını sağlar. Kısıt (3.11) ile her  $k$  aracının rotası boyunca olan toplam talep miktarının, aracın kapasitesini aşmaması sağlanır. Kısıt (3.12) ise alt tur engelleme kısıtıdır.

### 3.1.3. Simetrik KARP matematiksel modeli

$G$  serimi yönsüz ve maliyet matrisi simetrik ( $c_{ij} = c_{ji} \quad \forall i, j \in A$ ) ise ilgili problem “Simetrik KARP” olarak adlandırılır. Simetrik problemde  $A$  ayrıtlar kümesinin yerine  $E$  yönsüz kenar kümesi kullanılır. Laporte ve Nobert’in geliştirdiği Simetrik KARP matematiksel modeli incelenmiştir [20].

#### İndisler ve Kümeler

$V$ : Depo dâhil tüm noktalar kümesi (0 noktası depo noktasıdır)  $i, j, h \in V$

#### Parametreler

$c_{ij}$ : Simetrik seyahat maliyeti matrisi (Mesafe cinsinden)

$C$ : Araç Kapasitesi

$d_j$ : Talep vektörü

$K$ : Tanımlı araç sayısı

$r(S) = K_{min} = \frac{\sum_{i \in S} d_i}{C}$  - Müşterilere hizmet verebilecek minimum araç sayısı

#### Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{araç } i \text{ noktasından } j \text{ noktasına giderse } (i, j \in V) \\ 2, & \text{araç depo noktasından } j \text{ noktasına gider ve tekrar geri dönerse } (j \in V \setminus \{0\}) \\ 0, & \text{gitmezse} \end{cases}$$

#### Amaç Fonksiyonu

$$Enk z = \sum_{i \in V \setminus \{n\}} \sum_{j > i} c_{ij} x_{ij} \quad (3.13)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{h < i} x_{hi} + \sum_{j > i} x_{ij} = 2 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j} = 2K \quad (3.15)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j > i \\ j \in S}} x_{ij} \leq |S| - r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (3.16)$$

Amaç fonksiyonu (3.13)’de amaç, toplam seyahat maliyetinin (mesafe) en küçüklenmesidir. Kısıt (3.14) her müşteri noktasının diğer noktalarla iki ayrıt oluşturmasını sağlar. Kısıt (3.15) ile depo noktasının, müşteri noktalarıyla doğrudan  $2K$

sayıda ayrıt oluşturması sağlanır ( $K$  kullanılan araç sayısını göstermektedir). Kısıt (3.16) ise alt tur engelleme kısıtıdır.

### 3.1.4. KARP için yük akış matematiksel modeli

Baldacci, Hadjiconstantinou ve Mingozzi'nin önerdiği matematiksel model incelenmiştir. Bu matematiksel model akış tabanlı bir model olup modelde yük akış karar değişkeni kullanılmıştır [22].

#### İndisler ve Kümeler

$V$ : Depo dahil tüm noktalar kümesi (0 noktası depo noktasıdır)

$V'$ : Depo ve deponun kopyası olarak ilave edilen  $n+1$  noktası dâhil tüm noktalar kümesi (0 noktası depo,  $n+1$  ise deponun kopyası olan sanal depodur).

$G = (V, A)$  serimine  $n+1$  noktası eklendiğinde serim

$G' = (V', A')$  olmaktadır.

$(i, j) \in A'$

#### Parametreler

$c_{ij}$ : Maliyet matrisi (Mesafe)

$C$ : Araç Kapasitesi

$d_j$ : Talep vektörü

$K$ : Kullanılabilecek araç sayısı

#### Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ ayrıtı kullanırsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (i, j) \in A'$$

$y_{ij}$ :  $i$  noktasından  $j$  noktasına giden aracın üzerindeki yükü (rotadaki müşteri taleplerinin toplamı)

$y_{ji}$ :  $j$  noktasından  $i$  noktasına gelen aracın kalan boş kapasitesi ( $y_{ji} = C - y_{ij}$ )

$y_{ij} \geq 0$

( $y_{ij}$ : Yük akış değişkeni)

#### Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } z = \sum_{(i,j) \in A'} c_{ij} x_{ij} \quad (3.17)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{j \in V'} (y_{ji} - y_{ij}) = 2d_i \quad \forall i \in V' \setminus \{0, n+1\} \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n+1\}} y_{0j} = d(V \setminus \{0, n+1\}) \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n+1\}} y_{j0} = KC - d(V \setminus \{0, n+1\}) \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n+1\}} y_{n+1j} = KC \quad (3.21)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = Cx_{ij} \quad \forall (i, j) \in A' \quad (3.22)$$

$$\sum_{\substack{j \in V' \\ i < j}} x_{ij} + \sum_{\substack{j \in V' \\ i > j}} x_{ji} = 2 \quad \forall i \in V' \setminus \{0, n+1\} \quad (3.23)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A' \quad (3.24)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A' \quad (3.25)$$

Amaç fonksiyonu (3.17)'de amaç, toplam maliyetin (mesafe) en küçüklenmesidir. Kısıt (3.18), depo ve sanal depo noktası dışında bir müşteri noktasına giren ve çıkan yük akış değişkenlerinin toplamları farkının, o müşteri noktasının talebinin iki katına eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.19), depodan çıkan yük akış değişkenlerinin toplamının, toplam talebe eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.20), depoya giren yük akış değişkenleri toplamının, araçların toplam kapasitesi ile toplam talep arasındaki farka eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.21), sanal depodan çıkan yük akış değişkenleri toplamının, kullanılan araçların toplam kapasitesine eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.22), her bir ayrıt için; eğer ayrıt izlenmişse o ayrıta ait yük değişkenlerinin toplamının, araç kapasitesine eşit olmasını, eğer ayrıt izlenmemişse 0 (sıfır) olmasını sağlar. Kısıt (3.23), her bir müşteri noktasına ait ayrıtlar toplamının 2 olmasını sağlar. Kısıt (3.24), yük akış karar değişkeninin negatif olmadığını gösterir. Kısıt (3.25),  $x$  karar değişkeninin binary karar değişkeni olduğunu ifade eder.

### 3.2. HFARP Matematiksel Modeli

Gheysens, Golden ve Assad'ın (1984) önerdiği matematiksel model incelenmiştir [31].

#### İndisler ve Kümeler

$V$ : Depo dâhil tüm noktalar kümesi (0 (sıfır) noktası depo noktasıdır)

$i, j, l \in V$   $i, j, l = 0, \dots, n$

$K$ : Araçlar kümesi

$T$ : Araç tipi sayısı

$k \in K$

$k = 1, \dots, T$

#### Parametreler

$Q_k$ :  $k$ . tip aracın kapasitesi ( $Q_1 < Q_2 < \dots < Q_T$ )

$f_k$ :  $k$ . tip aracın sabit maliyeti (depodan çıkma maliyeti) ( $f_1 < f_2 < \dots < f_T$ )

$d_j$ :  $j$ . müşterinin talebi

$c_{ij}$ :  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine seyahat maliyeti ( $c_{ij} = c_{ji}$ )

#### Karar Değişkenleri

$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & k. \text{ tip araç } i \text{ noktasından } j \text{ noktasına giderse} \\ 0, & \text{gitmezse} \end{cases}$

$y_{ij}$ :  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine giden yük akış miktarı

#### Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } z = \sum_{k=1}^T f_k \sum_{j=1}^n x_{0j}^k + \sum_{k=1}^T \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (3.26)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^T \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.27)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij}^k - \sum_{l=0}^n x_{jl}^k = 0 \quad j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, T \quad (3.28)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ij} - \sum_{l=0}^n y_{jl} = d_j \quad j = 1, \dots, n \quad (3.29)$$

$$y_{0j} \leq \sum_{k=1}^T Q_k x_{0j}^k \quad j = 1, \dots, n \quad (3.30)$$

$$y_{ij} \leq M \sum_{k=1}^T x_{ij}^k \quad i \neq j = 0, \dots, n \quad (3.31)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad i \neq j = 0, \dots, n \quad (3.32)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad i \neq j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, T \quad (3.33)$$

Amaç fonksiyonu (3.26)'da amaç, toplam rota maliyetini ve araçların sabit maliyetini en küçükleme. Kısıt (3.27), her müşteri noktasına sadece bir araçla ve bir noktadan gelinmesini sağlar. Kısıt (3.28), araç akış kısıtıdır. Bir noktaya hangi araçla gelinmişse o araçla çıkılmasını sağlar. Kısıt (3.29), her bir müşteri noktasına gelen yük akış miktarı ile aynı müşteri noktasından çıkan yük akış miktarının farkının her zaman o müşterinin talebine eşit olmasını sağlar. Kısaca talep karşılanma kısıtıdır. Kısıt (3.30), her bir rotadaki toplam yük akış miktarının ( $y_{0j}$ ) o rotaya atanan aracın kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (3.31)'de,  $M$  büyük bir sayıyı ifade etmek üzere  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine herhangi bir araç gitmemişse iki nokta arasında yük akışı da olmamalıdır ( $\sum_{k=1}^T x_{ij}^k = 0$  olma durumu). Kısıt (3.32), yük akış karar değişkeninin negatif olmadığını gösterir. Kısıt (3.33),  $x$  araç akış karar değişkeninin binary karar değişkeni olduğunu ifade eder.

### 3.3. ZPARP Matematiksel Modeli

Toth ve Vigo'nun önerdiği matematiksel model incelenmiştir [14].

#### İndisler ve Kümeler

$V$ : 0 ve  $n+1$  depoyu göstermek üzere depo noktaları dâhil tüm noktalar kümesi  $i, j \in V$

$N$ : Müşteri noktaları kümesi  $N = V \setminus \{0, n+1\}$

$K$ : Araçlar kümesi  $k \in K$

$G = (V, A)$  serimi  $(i, j) \in A$

#### Parametreler

$c_{ij}$ : Maliyet matrisi (Mesafe)

$C$ : Araç kapasitesi

$d_i$ : Talep vektörü

$t_{ij}$ : Seyahat süresi

$s_i$ : Servis süresi

$a_i$ : Servise en erken başlama zamanı

$b_i$ : Servise en geç başlama zamanı

### Karar Değişkenleri

#### Akış Değişkeni;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & (i, j) \text{ ayrıtı } k \text{ aracı tarafından kullanılırsa } (i, j) \in A \\ 0, & d. d. \end{cases}$$

#### Zaman Değişkeni;

$w_{ik}$ :  $k$  aracıyla  $i$  noktasında servise başlama zamanı

#### Amaç Fonksiyonu

$$Enk z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (3.34)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.35)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.36)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (3.37)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.38)$$

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ij} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.39)$$

$$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.40)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in \{0, n+1\} \quad (3.41)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K \quad (3.42)$$

$$w_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.43)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.44)$$

Amaç fonksiyonu (3.34)'de amaç, toplam maliyetin (mesafe) en küçüklenmesidir. Kısıt (3.35), her bir müşterinin bir araç rotasına atanmasını sağlar. Kısıt (3.36), her bir aracın depodan bir defa çıkmasını sağlar. Kısıt (3.37), müşteri noktasına hangi araçla gelinmişse o araçla ayrılmayı sağlar. Araç akış kısıtıdır. Kısıt (3.38), her bir aracın depoya dönmesini sağlayan kısıttır. Kısıt (3.39), zaman akış kısıtıdır. Kısıt (3.40), her müşteriye kendi zaman penceresinde bir araç tarafından hizmet verilmesini sağlar. Kısıt (3.41), depoya ait zaman değişkenlerinin, depodan en erken ayrılış ve en son dönüş zamanlarının arasında olmasını sağlar. Kısıt (3.42), aracın rotası boyunca taşıdığı toplam talep miktarının aracın kapasitesini aşmamasını sağlar. Araç kapasite kısıtıdır. Kısıt (3.43), zaman akış karar değişkeninin negatif olmadığını gösterir. Kısıt (3.44),  $x$  karar değişkeninin binary karar değişkeni olduğunu ifade eder.

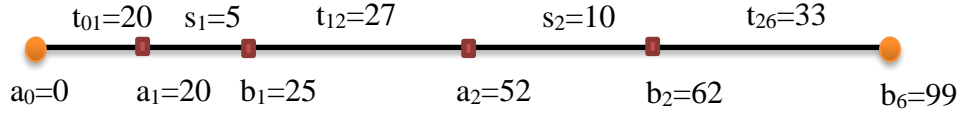
Toth ve Vigo'nun matematiksel modeline bağlı olarak, zaman çizelgesi kavramı örnekteki gibi açıklanır.  $G=(V,A)$  seriminde 0 (sıfır) ve  $n+1$  noktaları depoyu gösterir.  $G$  serimindeki bütün uygun araç rotaları 0 (sıfır) düğümünde başlar ve  $n+1$  düğümünde biter. 0 (sıfır) ve  $n+1$  noktalarının zaman penceresi,  $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$ 'dir.  $E$  depodan en erken ayrılış zamanını,  $L$  ise depoya en son varış zamanını gösterir.

Depo noktalarının talebi ve servis süreleri 0 (sıfır)'dır.  $d_0 = d_{n+1} = s_0 = s_{n+1} = 0$

En uygun çözüm;  $a_0 = E \leq \min_{i \in V \setminus \{0\}} b_i - t_{0i}$  ve  $b_{n+1} = L \geq \min_{i \in V \setminus \{0\}} a_i + s_i + t_{i0}$  şartları sağlandığında olur.

$a_i + s_i + t_{ij} > b_j$  ve  $d_i + d_j > C$  durumlarında ise yol (arc) yoktur.

**Örnek:** 0 ve 6 noktaları depoyu göstermek üzere, aracın 0-1-2-6 yolunu izlediği ve zaman penceresinin Şekil 2.3'deki gibi olduğu göz önüne alındığında zaman çizelgesi aşağıda gösterildiği şekilde işleyecektir.



**Şekil 3.1.** Zaman Çizelgesi

$$[a_0, b_0] = [a_6, b_6] = [E, L] = [0, 99]$$

$$a_0 = E \leq \min_{i \in V \setminus \{0\}} b_i - t_{0i}$$

$i=1$  için  $b_1$  değerinin minimum olduğunu varsayılırsa:

$$a_0 = E \leq b_1 - t_{01}$$

$$0 \leq 25 - 20$$

$0 \leq 5$  şartının sağlanmış olduğu görülür.

$$b_{n+1} = L \geq \min_{i \in V \setminus \{0\}} a_i + s_i + t_{i0}$$

$i=1$  için  $a_1$  değerinin minimum olduğu varsayılırsa:

$$b_6 = L \geq a_1 + s_1 + t_{10}$$

$$t_{10} = t_{16} = t_{12} + s_2 + t_{26} = 27 + 10 + 33 = 70$$

$$99 \geq 20 + 5 + 70$$

$99 \geq 95$  koşulları sağlanır.

Aynı şekilde  $i=1$  ve  $j=2$  olduğu varsayılırsa;

Araç tarafından 1. müşteri ve 2. müşteri arasındaki yolun kullanılmadığı varsayımı ile aşağıdaki ifadenin doğru olması gerekir.

$$a_i + s_i + t_{ij} > b_j$$

$$a_1 + s_1 + t_{12} > b_2$$

$$20 + 5 + 27 > 62$$

$$52 > 62$$

İfadesi yanlış olduğu için 1. müşteri ve 2. müşteri arasındaki yol kullanılabilir.

Rotanın uygun çözümde olabilmesi için  $a_i + s_i + t_{ij} < b_j$  olması gerekir. Sadece bu ifadeyi bilmek yetmez, aynı zamanda,  $d_i + d_j > C$  yani  $d_1 + d_2 > C$  olmamalıdır. Diğer deyişle müşterilerin talepleri toplamı aracın kapasitesinden küçük olmalıdır ( $d_1 + d_2 < C$ ).

### 3.4. ÇDHFARP Matematiksel Modeli

ÇDHFARP için Salhi, Imran ve Wassen'ın önerdiği matematiksel model incelenmiştir [77].

#### İndisler ve Kümeler

$i, j$ : tüm noktalar kümesi ( $i, j = 1, \dots, n + m$ )

$d$ : depolar kümesi ( $d = n + 1, \dots, n + m$ )

$k$ : araç tipi kümesi ( $k = 1, \dots, K$ )

#### Parametreler

$q_i$ : talep vektörü (depo noktalarının talepleri 0 (sıfır)'dır.)

$q_i = 0; i = n + 1, \dots, n + m$

$K$ : araç tipi sayısı

$Q_k$ :  $k$ . araç tipinin kapasitesi

$F_k$ :  $k$ . araç tipinin sabit maliyeti

$\alpha_k$ :  $k$ . tip aracın birim çalışma maliyeti ( $k$ . tip aracın birim mesafe başına oluşan rota maliyeti)

$D_{ij}$ :  $i$  ve  $j$  noktaları arasındaki mesafe

#### Karar Değişkenleri

$x_{ijkd} = \begin{cases} 1, & d \text{ başlangıç deposundan çıkan } k \text{ araç tipi } (i, j) \text{ yolunu izlerse} \\ 0, & \text{d.d.} \end{cases}$

$y_{ij}$ :  $i$  noktasından  $j$  noktasına giden aracın  $j$  noktasına ulaşmadan önceki toplam yükünü ifade eden karar değişkeni.

#### Amaç Fonksiyonu

$$Enk z = \sum_{d=n+1}^{n+m} \sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=n+1}^{n+m} \sum_{j=1}^n x_{ijkd} + \sum_{d=n+1}^{n+m} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} \alpha_k D_{ij} x_{ijkd} \quad (3.45)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{d=n+1}^{n+m} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n+m} x_{ijkd} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.46)$$

$$\sum_{d=n+1}^{n+m} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n+m} x_{ijkd} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (3.47)$$

$$\sum_{i=1}^{n+m} x_{ijkd} = \sum_{i=1}^{n+m} x_{jikd} \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, n + m; \\ d = n + 1, \dots, n + m \end{array} \quad (3.48)$$

$$\sum_{i=n+1}^{n+m} \sum_{j=1}^n y_{ij} = \sum_{j=1}^n q_j \quad (3.49)$$

$$\sum_{i=1}^{n+m} y_{ij} - \sum_{i=1}^{n+m} y_{ji} = q_j \quad j = 1, \dots, n \quad (3.50)$$

$$y_{ij} \leq \sum_{d=n+1}^{n+m} \sum_{k=1}^K Q_k x_{ijkd} \quad i = 1, \dots, n + m; j = 1, \dots, n \quad (3.51)$$

$$x_{ijkd} = 0 \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K; \\ i \neq d = n + 1, \dots, n + m \end{array} \quad (3.52)$$

$$x_{ijkd} = 0 \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K; \\ j \neq d = n + 1, \dots, n + m \end{array} \quad (3.53)$$

$$x_{ijkd} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, K; \\ d = n + 1, \dots, n + m \end{array} \quad (3.54)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, n + m \quad (3.55)$$

Amaç fonksiyonu (3.45)'de amaç, araçların sabit ve rotalama maliyetleri toplamını en küçükmektir. Kısıt (3.46), her bir müşteri noktasına bir defa gelinmesini sağlar. Kısıt (3.47), her bir müşteri noktasından bir defa çıkılmasını sağlar. Kısıt (3.48), araç akış kısıtıdır. Bir noktaya hangi araç tipiyle gelinmişse o araç tipiyle çıkılmasını sağlar. Kısıt (3.49), tüm depo noktalarından çıkan toplam yük miktarının müşterilerin toplam talebine eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.50), her bir müşteri noktasına gelen toplam yük miktarının müşteriden çıkan toplam yük miktarına farkının, müşterinin talebine eşit olmasını sağlar. Kısıt (3.51), yük miktarının araç kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (3.52), farklı depo noktalarından çıkılamamasını sağlayan kısıttır. Kısıt (3.53), farklı depo noktalarına dönülememesini sağlar. Kısıt (3.54),  $x$  karar değişkeninin binary olduğunu gösterir. Kısıt (3.55), yük akış değişkeninin negatif olmadığını ifade eder.

Yukarıda sunulan matematiksel modeller dışında Alpaslan'ın (2015) HFARP'ne yönelik Karaoğlan (2012) vd.'nin tesis ve eş zamanlı dağıt-topla rotalama problemine yönelik geliştirdiği matematiksel modeller incelenmiştir [84, 85].

## 4. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELLER

### 4.1. Araştırma Problemi

Lojistik ve kargo işletmeleri için karar verme sürecinde mevcut kaynaklarını ekonomik bir şekilde kullanmak, maliyetlerini azaltmak ve hızlı bir taşıma gerçekleştirmek çok önemlidir. Günümüzde teknolojiye baş döndürücü gelişmelere ve küreselleşmeye paralel olarak ulaşım hizmetinin iki önemli unsuru taşıma araçları ve ulaşım ağlarında (demiryolu, karayolu, havaalanı ağı gibi) çok hızlı gelişim yaşanmaktadır. Buna bağlı olarak, özellikle son yıllarda ulaştırma sektöründe birden fazla depo ve taşıma türünün bir arada kullanıldığı zamana bağlı bir ulaştırma anlayışı ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, lojistik ve kargo işletmelerinin kısa ve uzun vadeli stratejik planlarına yardımcı olmak üzere özellikle zamana bağlı birden çok deponun kullanıldığı ve en az iki taşıma türünün entegre edildiği ÇDHFZPARP'ye yönelik ilgili taşıma türlerinin ve sektöre özgü kriterlerin de dikkate alındığı matematiksel modellerin geliştirilmesi ve bu modellerin çözümünün ortaya konması gerekmektedir. Bu kapsamda problemin gerçekçi bir araştırma problemini yansıtmaları için Ekol Lojistik firması ile ortak bir proje yürütülmüştür.

Ekol Lojistik; Almanya, Romanya, İtalya, Bosna Hersek, Fransa, Yunanistan, Macaristan, İspanya ve Ukrayna'da 86.000 m<sup>2</sup>'yi aşan depolama alanı ve 1.200 çok uluslu çalışanı ile hizmet veren bir Türk Şirketi'dir. Ekol Lojistik, kara taşımacılığı ve ro-ro taşımacılık ile intermodal taşımacılık yapmaktadır. İstanbul Haydarpaşa Limanı'ndan ro-ro gemilerine yüklenen treyler veya konteynerlar İtalya'nın Trieste Limanı'nda indirilmekte ve buradan Avrupa'nın iç bölgelerine demiryolu veya karayolu ile gönderilmektedir. Firma, müşterilerin özel istekleri doğrultusunda acenteler aracılığıyla havayolu taşımacılığını da kullanmaktadır. Firma özellikle faaliyet alanına havayolu taşımacılığını da katmak istemekte ve bu alanda yatırım yapmak amacıyla ön araştırmalar yapmaktadır. Firmanın problemi, Avrupa ve Türkiye'de depo ve müşterilerin belli olduğu bir serimde Avrupa ve Türkiye içinde yükün havayolu ve karayolu taşımacılığı kullanılarak dağıtımının yapılması problemidir [86].

Problem genel olarak;

- Kullanılacak karayolu araç tiplerinin belirlenmesi,
- Kullanılacak uçak tiplerinin belirlenmesi,
- Havayolu ve karayolu ile ilgili maliyet ve kriterlerin belirlenmesi,

- Havayolu ve karayolu araçlarının rotalanması, aşamalarından oluşmaktadır.

Öte yandan müşterilerin belli olduğu ancak depoların belli olmadığı bir serimde maliyetleri enküçükleyecek şekilde depoların da belirlendiği havayolu ve karayolu araçlarının rotalanması çalışmada ele alınan bir diğer problemdir.

Söz konusu problem genel olarak;

- Kullanılacak karayolu araç tiplerinin belirlenmesi,
- Kullanılacak uçak tiplerinin belirlenmesi,
- Havayolu ve karayolu ile ilgili maliyet ve kriterlerin belirlenmesi,
- Depoların belirlenmesi ve havayolu ve karayolu araçlarının rotalanması, aşamalarından oluşmaktadır.

#### **4.2. Araştırmanın Amacı**

Yük taşımacılığını kapsayan bu çalışmanın genel amacı, lojistik ve kargo işletmelerinin taşıma faaliyetlerinde kaynaklarını etkin ve verimli bir şekilde kullanmalarını sağlamak üzere yol gösterici bir çalışma ortaya koymaktır. Sözü edilen kapsamda ortaya konan bu çalışma ile bir taşıma ağında maliyetin en küçüklenmesi amacı altında birden fazla taşıma türü kullanılarak taşınacak yükün hızlı ve güvenilir bir şekilde alıcılara ulaştırılmasını esas alan ARP'ye yönelik bir matematiksel modelin geliştirilmesi ve çözümünün ortaya konulması hedeflenmiştir. Geliştirilen modelin çözümü ile filo planlamaya yönelik olarak filo büyüklüğünün belirlenmesi çalışmanın bir diğer hedefidir.

Özel amaç olarak ise geliştirilecek matematiksel model ve çözümü ile Ekol Lojistik firmasına, Avrupa ile Türkiye arasında yeni bir faaliyet alanı olarak planladığı havayolu ve karayolu taşımacılığı kapsamında taşıma ağı ve filo planlama konularında bir çözüm önerisi ortaya koymaktır.

Özetle çalışmanın genel amacı:

- Yük taşımacılığında özellikle son zamanlarda gelişen ve gelişmeye açık bir sektör olan havacılığın taşımacılık sektörü üzerindeki etkisini ortaya koymak,
- Lojistik ve kargo taşımacılığı yapan firmalara kaynaklarını etkin kullanmaları için çözüm sunmaktır.

Çalışmanın özel amacı ise Ekol Lojistik firması tarafından taşımacılıkta yeni bir faaliyet alanı olarak planlanan havayolu ve karayolu taşımacılığı konusunda firmaya çözüm önerisi sunmaktır.

### 4.3. Araştırmanın Önemi

Günümüzde dünya genelinde ticaretin artması işletmelerin de hızlı ve güvenilir taşımacılık sistemlerine yönelik taleplerini arttırmaktadır. Bu kapsamda dünyada özellikle birden fazla taşımacılık türünün kullanıldığı taşımacılık yaklaşımları tercih edilmektedir [87]. Özellikle son yıllarda havayolu taşımacılığı, tercih edilme oranındaki artış ile taşıma türleri içerisinde dikkatleri üzerine çekmektedir.

Havayolu taşımacılığının dünyada ve ülkemizde son yıllarda kat ettiği mesafe göz önüne alındığında gelişmeye açık bir sektör olduğu görülmektedir. Buna paralel olarak özellikle yakın gelecekte yük taşımacılığında havayolu taşımacılığının yer aldığı taşımacılık anlayışının daha çok rağbet göreceği açıktır. Bu kapsamda havayolu ve karayolunun birlikte ele alındığı, taşımacılıkta farklı taşıma türlerinin bir arada kullanıldığı araç rotalama probleminin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi önemli bir araştırma konusu olarak durmaktadır.

Asya ve Avrupa kıtalarının kesişim noktası üzerinde olması nedeniyle ülkemiz üzerindeki yük trafiği gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum ülkemizde de taşımacılığı önemli bir konuma getirmektedir. Konu ile ilgili yapılan görüşmeler ve istatistiksel verilerin incelenmesi neticesinde özellikle ülkemizde taşımacılık türlerinin kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmadığı görülmektedir. Dünya genelinde yaygın bir kargo ağına sahip olan FedEx ve UPS kargo firmaları incelendiğinde bu şirketlerin bütün ulaşım türlerini birlikte kullandıkları göze çarpmaktadır [88].

Ülkemizde bütün ulaşım türlerini birlikte kullanan taşımacılık firmalarının sayısı yok denecek kadar azdır. Bunun yanında Ekol Lojistik, denizyolu ve karayolu taşıma türlerini entegre ederek ülkemizde ve Avrupa'da intermodal taşımacılığın öncülüğünü yapmıştır. Fakat kendilerine ait havayolu araç filosu ile diğer taşımacılık türlerinin bir arada kullanıldığı bir taşıma faaliyetinde bulunmamaktadır. Bu genel değerlendirmeden de anlaşılacağı üzere ülke genelinde ulaştırma alt sistemleri ile havayolu taşımacılığı arasında etkin bir entegrasyonunun sağlanamadığı görülmektedir. Araştırma bu yönüyle ülkemizde faaliyet gösteren işletmelere temel bir fikir sunması açısından önem arz etmektedir.

Diğer yandan yapılan araştırmalar neticesinde lojistik ve kargo sektöründe, gerek ülkemizde ve gerekse yurtdışında özellikle havayolu taşımacılığının da dâhil edildiği birden fazla taşıma türünün bir arada kullanıldığı herhangi bir akademik çalışmaya

rastlanmamıştır. Bu kapsamda çalışma literatüre katkısının yanı sıra lojistik ve kargo işletmecilerine farklı bir bakış açısı kazandırması ve yük taşımacılığına yeni bir boyut getirmesi açısından son derece önemlidir.

Lojistik ve kargo firmalarının planlamalarını etkin bir şekilde yapmaları; araç, insan gibi kaynaklarını verimli kullanmalarını, uzun vadeli stratejik planlarında maliyetlerin azaltılıp kârlılık oranının artırılmasını ve müşteri memnuniyetinin artırılmasını sağlar. Bu çalışma, firmalara planlamalarını etkin bir şekilde yapmaları konusunda yardımcı olma noktasında önem arz etmektedir.

Sonuç olarak çalışma:

✓ Özgünlük açısından;

- Havacılık alanında yapılması,
- Havayoluna ait maliyet ve kriterlerin kullanılması,
- Bir firmaya ait gerçek bir araştırma problemi olması ve gerçek test verilerinin kullanılması yönüyle

✓ Literatür açısından;

- Havayolu ve karayolu taşımacılığının birlikte kullanıldığı çalışmaların sınırlı olması,
- Birden fazla deponun kullanıldığı çok depo ile ilgili çalışmaların az sayıda olması,
- Yük taşımacılığında havacılık ve havacılığa ait kriterlerin detaylı ele alınması yönüyle

✓ Ülke ve taşımacılık firmaları açısından;

- Lojistik ve havacılık sektörlerinin gelişmeye açık sektörler olması,
- Maliyetlerin azaltılması ve araç ve insan gibi kaynakların etkin kullanılması ile ekonomiye katkı sağlanması,
- Yeni bir faaliyet alanı olarak havacılığın teşvik edilmesi yönüyle

önemlidir.

#### 4.4. Araştırmanın Kapsam ve Yöntemi

Lojistik alanında faaliyet gösteren Ekol Lojistik firmasının taşımacılık yaptığı Türkiye ve Avrupa'daki müşteri noktaları araştırmanın kapsamını oluşturmaktadır. Firma hem Türkiye hem de Avrupa'da taşımacılık yaptığı için araştırmanın kapsamı yurtiçi ve yurtdışı olarak da ele alınabilir.

Çalışmada iki farklı matematiksel model geliştirilmiştir. İlk matematiksel modelde, Ekol Lojistik firmasının talepleri doğrultusunda depo noktalarının belirli olduğu genel bir matematiksel model ortaya konulmuştur. İkinci matematiksel modelde ise depo noktalarının belli olmadığı durum göz önüne alınarak, depo noktalarının model tarafından belirlendiği genel bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modeller GAMS 23.5.1 paket programının Cplex 12.2 çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür.

#### 4.5. Matematiksel Modeller

Bu bölümde ÇDHFZPARP üzerine geliştirilen iki model (Matematiksel model 1 ve Matematiksel model 2) sunulmuştur. Problem, çok depolu bir ağda heterojen filolu araçların belirli bir zaman dilimi içerisinde rotalanması problemidir. Problem, belirli depo ve belirsiz depo koşullarında ele alınmıştır. Model 1'de depo noktalarının yeri bellidir ve araçlar buna göre rotalanmaktadır. Model 2'de aday depo noktaları bellidir ve model ile araç rotalama yanında depolar da belirlenmektedir. Aşağıda geliştirilen matematiksel modeller sunulmuştur.

##### 4.5.1. Matematiksel model 1

$G(N,A)$  serimini göstermek üzere;  $N= 1, \dots, m+n$  depolar dahil olmak üzere tüm noktaları,  $A$  ise bu noktalar arasındaki yolları ifade eder.

$N= 1, \dots, m+n$  noktalar kümesinde;

$N_0= 1, \dots, m$ ,  $m$  adet depo noktasını,  $N_c= m+1, \dots, m+n$ ,  $n$  adet müşteri noktasını ifade eder.

$$N = N_0 \cup N_c$$

## Varsayımlar

- Depo noktaları bellidir.
- Müşteri noktaları bellidir.
- Depo ve müşteri noktaları havaalanıdır.
- Her müşteri noktasının talebi bellidir ve bölünemez.
- Araç filosu bellidir ve araçlar depo noktalarında bulunur.
- Şirket öz kaynaklarını kullanacaktır ve yatırım maliyetleri göz ardı edilmiştir.
- Araçların hızları: Kara araçlarında ortalama hız, hava araçlarından Airbus ve Boeing için Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı (Eurocontrol) tarafından uçak veri tabanında (BADA) belirtilen 35.000 ft irtifadaki düz uçuş hızı, Cessna için 25.000 ft irtifadaki düz uçuş hızı esas alınmıştır.

## Kümelere

$i, j$ : tüm noktalar kümesi  $i, j = 1, \dots, m + n$

$k, h$ : depo noktaları kümesi  $k, h = 1, \dots, m$

$t$ : araç türü kümesi  $t = 1, \dots, p + r$

Araç türü kümesinde;  $1, \dots, p$  karayolu araçlarını,  $p+1, \dots, p+r$  havayolu araçlarını gösterir.

$v$ : araç türlerine ait araç sayısı kümesi  $v = 1, \dots, A_t$

## Parametreler

$c_{ijt}$ :  $i$  şehrinden  $j$  şehrine giden  $t$ . tür araca ait mesafe

$H_{ijt}$ :  $i$  şehrinden  $j$  şehrine  $t$ . tür aracın seyahat süresi

$F_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının kullanım maliyeti (sabit maliyet)

$L_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının (uçaklar için) kalkış-tırmanma-iniş esnasında oluşan yakıt maliyeti  
LTO (Landing-Take Off) maliyeti

$\alpha_t$ :  $t$ . tür aracın birim taşıma maliyeti

$\beta_{kt}$ :  $k$ . depodaki  $t$ . tür aracın boş kalan kapasitesi için ceza maliyeti (uçaklar için)

$A_t$ :  $t$ . türe ait araç sayısı

$B_t$ :  $t$ . tür araca ait kapasite oran parametresi ( $1/Q_t$ )

$Q_t$ :  $t$ . tür aracın kapasitesi

$d_j$ :  $j$  şehrinin talebi

$R_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının menzil matrisi (Kara araçları için menzil kısıtı olmadığından karayolu mesafeleri incelenmiş ve matriste menzil değeri olarak iki nokta arasındaki en büyük uzaklık değerinden daha büyük bir değer kullanılmıştır).

$l_i$ : aracın  $i$ . şehirdeki hizmet süresi (servis süresi)

$a_i$ :  $i$ . şehirde servise en erken başlama zamanı

$b_i$ :  $i$ . şehirde servise en geç başlama zamanı

$M$ : Büyük bir sayı

$n$ : Müşterilerin sayısı

### Karar Değişkenleri

$$x_{ijtv} = \begin{cases} 1, & t. \text{ türün } v. \text{ aracı } i \text{ şehirden } j \text{ şehrine giderse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$z_{kj} = \begin{cases} 1, & k. \text{ depoya } j. \text{ müşteri atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$s_{ktv}$ :  $k$ . depodan çıkan  $t$ . türün  $v$ . aracının boş kalan kapasitesini yüzde olarak gösteren karar değişkeni

$$0 \leq s_{ktv} \leq 1$$

$u_i$ : Alt turların engellenmesi için kullanılan karar değişkeni

$$0 \leq u_i$$

$w_{itv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının  $i$ . müşteride hizmete başlama zamanını gösteren karar değişkeni

$$0 \leq w_{itv}$$

### Amaç Fonksiyonu

$$\begin{aligned} \text{Enk } f = & \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} F_{tv} x_{kjt v} + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{t=p+1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} L_{tv} x_{ijtv} \\ & + \sum_{k=1}^m \sum_{t=p+1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} \beta_{kt} s_{ktv} + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} \alpha_t c_{ijt} x_{ijtv} \end{aligned} \quad (4.1)$$

### Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^m z_{kj} = 1 \quad j = m + 1, \dots, m + n \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \neq j}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijtv} = 1 \quad j = m + 1, \dots, m + n \quad (4.3)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \leq 1 \quad \forall t, \forall v \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \neq i}^{m+n} x_{ijtv} \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \quad \begin{array}{l} i = m + 1, \dots, m + n \\ \forall t, \forall v \end{array} \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt(v+1)} \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \quad \forall t, \forall v = 1, \dots, (A_t - 1) \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} x_{ijtv} - \sum_{i=1}^{m+n} x_{jit v} = 0 \quad \forall j, \forall t, \forall v \quad (4.7)$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{kjt v} \leq z_{kj} \quad \forall k; j = m + 1, \dots, m + n \quad (4.8)$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{jkt v} \leq z_{kj} \quad \forall k; j = m + 1, \dots, m + n \quad (4.9)$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijtv} + z_{ki} + \sum_{h \neq k}^m z_{hj} \leq 2 \quad \begin{array}{l} \forall k; i, j = m + 1, \dots, m + n \\ i \neq j \end{array} \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=m+1}^{m+n} d_j x_{ijtv} \leq Q_t \quad \forall t, \forall v \quad (4.11)$$

$$c_{ijt} x_{ijtv} \leq R_{tv} \quad \begin{array}{l} \forall i, \forall j, i \neq j, \\ t = p + 1, \dots, p + r; \forall v \end{array} \quad (4.12)$$

$$s_{ktv} \geq \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} - B_t \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=m+1 \\ j \neq i}}^{m+n} d_j x_{ijtv} \quad \forall k; t = p + 1, \dots, p + r; \forall v \quad (4.13)$$

$$w_{itv} + (l_i + H_{ijt}) x_{ijtv} - w_{jtv} \leq (1 - x_{ijtv}) M \quad \begin{array}{l} \forall i; j = m + 1, \dots, m + n, \\ i \neq j, \forall t, \forall v \end{array} \quad (4.14)$$

$$w_{jtv} + (l_j + H_{jkt} - b_k) x_{jkt v} \leq (1 - x_{jkt v}) M \quad \begin{array}{l} \forall k; j = m + 1, \dots, m + n, \\ \forall t, \forall v \end{array} \quad (4.15)$$

$$a_i \sum_{\substack{j=m+1 \\ j \neq i}}^{m+n} x_{ijtv} \leq w_{itv} \quad \forall i, \forall t, \forall v \quad (4.16)$$

$$w_{itv} \leq b_i \sum_{j \neq i}^{m+n} x_{jitv} \quad \forall i, \forall t, \forall v \quad (4.17)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijtv} \leq n - 1 \quad i, j = m + 1, \dots, m + n, i \neq j \quad (4.18)$$

Amaç fonksiyonu  $f(s, x)$  (4.1), araçların depodan çıkış maliyetleri toplamı, hava araçları için toplam LTO maliyeti toplamı, kullanılan hava araçlarının boş kalan kapasitelerinin ceza maliyeti toplamı ve toplam rotalama maliyetleri toplamının en küçüklenmesidir. Kısıt (4.2), her bir müşteri noktasının bir depo noktasına atanmasını sağlar. Kısıt (4.3), her müşteri noktasının bir defa ziyaret edilmesini sağlar. Kısıt (4.4)  $t$ . türe ait  $v$ . aracın en çok bir rotada kullanılmasını sağlar. Aracın rota takibi açısından önemli bir kısıttır. Kısıt (4.5),  $t$ . türe ait  $v$ . araç her hangi bir depodan çıkmamış ve bir rotaya atanmamışsa, müşteri noktalarında da kullanılamamasını sağlar. Kısıt (4.6),  $t$ . türe ait  $v$ . araç kullanılmadan  $(v+1)$ . aracın kullanılmamasını sağlar. Yani bir türe ait önceki indise sahip araç kullanılmadan sonraki indise sahip aracın kullanılmamasını sağlar. Kısıt (4.7), araç akış kısıtıdır. Her bir noktaya hangi araçla gelinmişse o araçla çıkılmasını sağlar. O noktaya herhangi bir araçla gelinmemişse aynı şekilde o noktadan herhangi bir araçla çıkış yapılamaz. Kısıt (4.8)-(4.10), aynı depoda başlayıp aynı depoda bitmeyen rotaların oluşmasını engeller. Rotanın aynı depoda başlayıp aynı depoda sonlanmasını sağlar.  $x$  karar değişkeni ile  $z$  karar değişkeni arasındaki ilişkiyi sağlayan kısıttır. Kısıt (4.11), araç kapasite kısıtıdır. Bu kısıt, aracın rotası boyunca taşıyacağı yükün aracın kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (4.12), hava araçları için menzil kısıtıdır. Kısıt (4.13), kullanılan hava araçlarının boş kalan kapasite miktarını belirler. Kısıt (4.14), (4.15), zaman akış kısıtlarıdır. Kısıt (4.16), (4.17), her müşteriye kendi zaman penceresinde hizmet verilmesini sağlar. Kısıt (4.18), Miller, Tucker ve Zemlin tarafından geliştirilen alt tur engelleme kısıtıdır [83].

## 4.5.2. Matematiksel model 2

$G(N,A)$  serimini göstermek üzere;  $N= 1, \dots, m+n$  depolar dahil olmak üzere tüm noktaları,  $A$  ise bu noktalar arasındaki yolları ifade eder.

$N= 1, \dots, m+n$  noktalar kümesinde;

$N_0= 1, \dots, m$ ,  $m$  adet depo noktasını,  $N_c= m+1, \dots, m+n$ ,  $n$  adet müşteri noktasını ifade eder.

$$N = N_0 \cup N_c$$

### Varsayımlar

- Aday depo noktaları bellidir.
- Müşteri noktaları bellidir.
- Depo ve müşteri noktaları havaalanıdır.
- Her müşteri noktasının talebi bellidir ve bölünemez.
- Araç filosu bellidir ve araçlar depo noktalarında bulunur.
- Şirket öz kaynaklarını kullanacaktır ve yatırım maliyetleri göz ardı edilmiştir.
- Araçların hızları: Kara araçlarında ortalama hız, hava araçlarından Airbus ve Boeing için Eurocontrol tarafından BADA'da belirtilen 35000 ft irtifadaki düz uçuş hızı, Cessna için 25000 ft irtifadaki düz uçuş hızı esas alınmıştır.

### Kümeler

$i, j$ : tüm noktalar kümesi  $i, j = 1, \dots, m + n$

$k, h$ : depo noktaları kümesi  $k, h = 1, \dots, m$

$t$ : araç türü kümesi  $t = 1, \dots, p + r$

Araç türü kümesinde;  $1, \dots, p$  karayolu araçlarını,  $p+1, \dots, p+r$  havayolu araçlarını gösterir.

$v$ : araç türlerine ait araç sayısı kümesi  $v = 1, \dots, A_t$

### Parametreler

$c_{ijt}$ :  $i$  şehrinde  $j$  şehrine giden  $t$ . tür araca ait mesafe

$H_{ijt}$ :  $i$  şehrinde  $j$  şehrine  $t$ . tür aracın seyahat süresi

$F_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının kullanım maliyeti (sabit maliyet)

$L_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının LTO maliyeti (uçaklar için kalkış-tırmanma-iniş esnasında oluşan yakıt maliyeti)

$\alpha_t$ :  $t$ . tür aracın birim taşıma maliyeti

$\beta_{kt}$ :  $k$ . depodaki  $t$ . tür aracın boş kalan kapasitesi için ceza maliyeti (uçaklar için)

$D_k$ :  $k$ . deponun açılma maliyeti (sabit maliyet)

$A_t$ :  $t$ . türe ait araç sayısı

$B_t$ :  $t$ . tür araca ait kapasite oran parametresi ( $1/Q_t$ )

$Q_t$ :  $t$ . tür aracın kapasitesi

$d_j$ :  $j$  şehrinin talebi

$V_k$ :  $k$ . deponun kapasitesi

$R_{tv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının menzil matrisi (Kara araçları için menzil kısıtı olmadığından karayolu mesafeleri incelenmiş ve matriste menzil değeri olarak iki nokta arasındaki en büyük uzaklık değerinden daha büyük bir değer kullanılmıştır).

$l_i$ : aracın  $i$ . şehirdeki hizmet süresi (servis süresi)

$a_i$ :  $i$ . şehirde servise en erken başlama zamanı

$b_i$ :  $i$ . şehirde servise en geç başlama zamanı

$M$ : Büyük bir sayı

$n$ : Müşterilerin sayısı

### Karar Değişkenleri

$$x_{ijtv} = \begin{cases} 1, & t. \text{ türün } v. \text{ aracı } i \text{ şehrinde } j \text{ şehrine giderse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & k. \text{ depo açılırsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$z_{kj} = \begin{cases} 1, & k. \text{ depoya } j. \text{ müşteri atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$s_{ktv}$ :  $k$ . depodan çıkan  $t$ . türün  $v$ . aracının boş kalan kapasitesini yüzde olarak gösteren karar değişkeni

$$0 \leq s_{ktv} \leq 1$$

$u_i$ : Alt turların engellenmesi için kullanılan karar değişkeni

$$0 \leq u_i$$

$w_{itv}$ :  $t$ . türün  $v$ . aracının  $i$ . müşteride hizmete başlama zamanını gösteren karar değişkeni

$$0 \leq w_{itv}$$

## Amaç Fonksiyonu

$$\begin{aligned}
 Enk f = & \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} F_{tv} x_{kjt v} + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{t=p+1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} L_{tv} x_{ijt v} \\
 & + \sum_{k=1}^m \sum_{t=p+1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} \beta_{kt} S_{ktv} + \sum_{k=1}^m D_k y_k + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} \alpha_t c_{ijt} x_{ijt v}
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

## Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^m z_{kj} = 1 \quad j = m + 1, \dots, m + n \tag{4.20}$$

$$\sum_{j=m+1}^{m+n} z_{kj} \leq My_k \quad \forall k \tag{4.21}$$

$$\sum_{i \neq j}^{m+n} \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijt v} = 1 \quad j = m + 1, \dots, m + n \tag{4.22}$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \leq 1 \quad \forall t, \forall v \tag{4.23}$$

$$\sum_{j \neq i}^{m+n} x_{ijt v} \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \quad i = m + 1, \dots, m + n \tag{4.24}$$

$\forall t, \forall v$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt(v+1)} \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} \quad \forall t, v = 1, \dots, (A_t - 1) \tag{4.25}$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} x_{ijt v} - \sum_{i=1}^{m+n} x_{jit v} = 0 \quad \forall j, \forall t, \forall v \tag{4.26}$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{kjt v} \leq z_{kj} \quad \forall k; j = m + 1, \dots, m + n \tag{4.27}$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{jktv} \leq z_{kj} \quad \forall k; j = m+1, \dots, m+n \quad (4.28)$$

$$\sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijtv} + z_{ki} + \sum_{h \neq k}^m z_{hj} \leq 2 \quad \forall k; i, j = m+1, \dots, m+n, \quad (4.29)$$

$$i \neq j$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=m+1}^{m+n} d_j x_{ijtv} \leq Q_t \quad \forall t, \forall v \quad (4.30)$$

$$\sum_{j=m+1}^{m+n} d_j z_{kj} \leq V_k \quad \forall k \quad (4.31)$$

$$c_{ijt} x_{ijtv} \leq R_{tv} \quad \forall i, \forall j, i \neq j, \quad (4.32)$$

$$t = p+1, \dots, p+r; \forall v$$

$$s_{ktv} \geq \sum_{j=m+1}^{m+n} x_{kjt v} - B_t \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=m+1 \\ j \neq i}}^{m+n} d_j x_{ijtv} \quad \forall k; t = p+1, \dots, p+r; \forall v \quad (4.33)$$

$$w_{itv} + (l_i + H_{ijt}) x_{ijtv} - w_{jtv} \leq (1 - x_{ijtv}) M \quad \forall i, j = m+1, \dots, m+n, \quad (4.34)$$

$$i \neq j, \forall t, \forall v$$

$$w_{jtv} + (l_j + H_{jkt} - b_k) x_{jktv} \leq (1 - x_{jktv}) M \quad \forall k; j = m+1, \dots, m+n, \quad (4.35)$$

$$\forall t, \forall v$$

$$a_i \sum_{\substack{j=m+1 \\ j \neq i}}^{m+n} x_{ijtv} \leq w_{itv} \quad \forall i, \forall t, \forall v \quad (4.36)$$

$$w_{itv} \leq b_i \sum_{j \neq i}^{m+n} x_{jitv} \quad \forall i, \forall t, \forall v \quad (4.37)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{t=1}^{p+r} \sum_{v=1}^{A_t} x_{ijtv} \leq n - 1 \quad i, j = m + 1, \dots, m + n, i \neq j \quad (4.38)$$

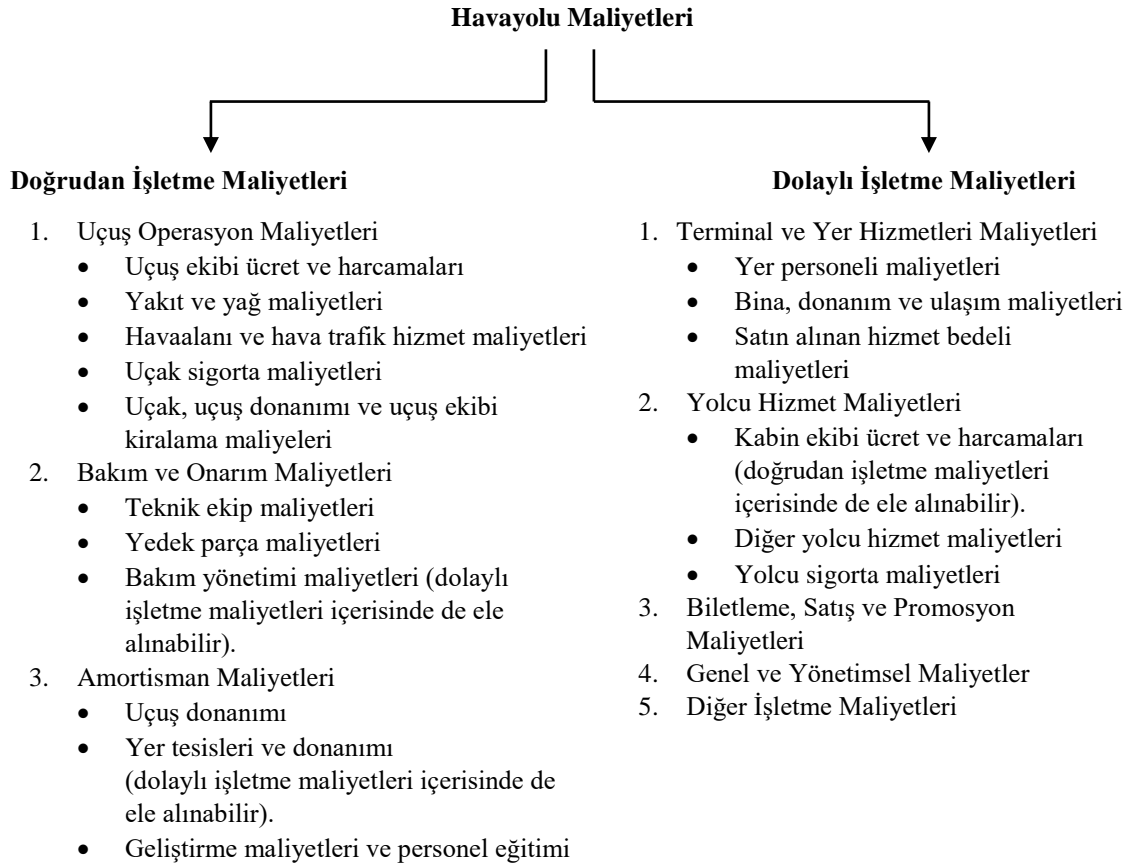
Amaç fonksiyonu  $f(s, x, y)$  (4.19); araçların depodan çıkış maliyetleri toplamı, hava araçları için toplam LTO maliyeti toplamı, kullanılan hava araçlarının boş kalan kapasitelerinin ceza maliyeti toplamı, depoların açılma maliyetleri toplamı ve toplam rotalama maliyetleri toplamının en küçüklüğüdür. Kısıt (4.20), her bir müşteri noktasının bir depo noktasına atanmasını sağlar. Kısıt (4.21), aday depolardan biri depo olarak açılmamışsa müşterilerin o depoya atanmamasını sağlar. Kısıt (4.22), her müşteri noktasının bir defa ziyaret edilmesini sağlar. Kısıt (4.23)  $t$ . türe ait  $v$ . aracın en çok bir rotada kullanılmasını sağlar. Aracın rota takibi açısından önemli bir kısıttır. Kısıt (4.24),  $t$ . türe ait  $v$ . araç her hangi bir depodan çıkmamış ve bir rotaya atanmamışsa, müşteri noktalarında da kullanılmamasını sağlar. Kısıt (4.25),  $t$ . türe ait  $v$ . araç kullanılmadan  $(v+1)$ . aracın kullanılmamasını sağlar. Yani bir türe ait önceki indise sahip araç kullanılmadan sonraki indise sahip aracın kullanılmamasını sağlar. Kısıt (4.26), araç akış kısıtıdır. Her bir noktaya hangi araçla gelinmişse o araçla çıkılmasını sağlar. O noktaya herhangi bir araçla gelinmemişse aynı şekilde o noktadan herhangi bir araçla çıkış yapılamaz. Kısıt (4.27)-(4.29), aynı depoda başlayıp aynı depoda bitmeyen rotaların oluşmasını engeller. Rotanın aynı depoda başlayıp aynı depoda sonlanmasını sağlar.  $x$  karar değişkeni ile  $z$  karar değişkeni arasındaki ilişkiyi sağlar. Kısıt (4.30), araç kapasite kısıtıdır. Bu kısıt, aracın rotası boyunca taşıyacağı yükün aracın kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (4.31), depo kapasite kısıtıdır. Depoya atanan müşterilerin talepleri toplamının deponun kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (4.32), hava araçları için menzil kısıtıdır. Kısıt (4.33), kullanılan hava araçlarının boş kalan kapasite miktarını belirleyen kısıttır. Kısıt (4.34), (4.35), zaman akış kısıtlarıdır. Kısıt (4.36), (4.37), her müşteriye kendi zaman penceresinde hizmet verilmesini sağlar. Kısıt (4.38), Miller, Tucker ve Zemlin'in geliştirdiği alt tur engelleme kısıtıdır [83].

## 4.6. Veriler

Çalışmada dikkate alınan araç tipleri, maliyetler ve parametreler hakkında bilgi aşağıda verilmiştir.

### 4.6.1. Havayolu maliyetleri

Havayolu maliyetleri doğrudan ve dolaylı işletme maliyetleri olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan işletme maliyetleri uçak tipine ve uçuşa bağlı olarak değişen maliyetlerdir. Doğrudan işletme maliyetinde, tüm uçuş giderleri (uçuş mürettebatının ücretleri, yakıt), bakım – onarım ve uçağın amortisman giderleri yer alır. Uçak tipinden ve uçağın kullanılmasından bağımsız olan maliyetler ise dolaylı işletme maliyetleri olarak ele alınmaktadır. Dolaylı işletme maliyetleri, yolcu ile ilgili (yolcu hizmet maliyetleri, biletleme ve satış maliyetleri, istasyon ve yer hizmet maliyetleri gibi) maliyetler ile genel yönetsel maliyetleri içerir (Şekil 4.1) [89].



**Şekil 4.1.** *Havayolu Maliyetlerinin Yapısı* [89].

#### 4.6.1.1. Doğrudan işletme maliyetleri

Doğrudan işletme maliyetleri; uçuş operasyon maliyetleri, bakım ve onarım maliyetleri ve amortisman maliyetlerini kapsar. Doğrudan işletme maliyetleri içerisinde en yüksek maliyeti, uçuş operasyon maliyetleri oluşturur. Uçuş ekibinin ücreti, seyahat ve konaklama harcamalarından uçuş ekibinin sigorta ve sağlık giderlerine kadar olan maliyetler uçuş operasyon maliyetlerinin en büyük kısmını oluşturur. Uçuş ekibi maliyeti, uçak tipine bağlı olarak “saatlik maliyet” şeklinde ifade edilir. Uçuş operasyon maliyetleri içerisinde ikinci en büyük maliyet ise yakıttır. Yakıt tüketimi, rotanın uzunluğuna, uçağın ağırlığına, rüzgârın durumuna, seyir yüksekliğine göre değişiklik gösterir. Yağ tüketimi ise yine belirli bir rotada uçan uçağın rota boyunca motorlarının saatlik yağ tüketiminin toplamıdır. Bir diğer önemli uçuş operasyon maliyeti de havaalanı ve hava trafik hizmet maliyetleridir. Hava yolları, pist kullanımı ve terminal hizmetleri için havaalanına ücret öder. Havaalanı ücretleri iki unsurdan oluşur. Bunlardan ilki uçağın ağırlığına bağlı olarak belirlenen uçak iniş ücreti, diğeri ise havaalanından uçağa binecek olan yolcu sayısına göre belirlenen vergilerdir. Bunlara ek olarak, uçak havaalanında park halinde belirlenen süreden daha fazla süre kalırsa park ücreti veya hangar ücreti ödenmektedir. Bu ücret, uçağın iniş maliyeti ve yolcu vergisi ile karşılaştırıldığında kıyaslanamayacak derecede düşüktür. Hava yolları aynı zamanda hava trafik hizmet maliyeti altında uçak uçtuğu rota boyunca seyrüsefer yardımları için seyrüsefer ücreti ödemektedir. Seyrüsefer ücretinde, uçağın ağırlığı ve uçağın hava sahasını kullandığı ülkenin üzerinde uçtuğu mesafe göz önüne alınır. Uçuş donanımlarının sigorta maliyetleri ise uçuş operasyon maliyetlerinin küçük bir kısmı oluşturur. Uçuş donanımları için ödenen sigorta primleri uçağın satın alınma bedeli üzerinden yıllık olarak yaklaşık %1,5 ile %3 arasında değişir. Sigorta primi hava yollarının sahip olduğu uçak filosu ve uçak tipine göre de değişiklik gösterir. Hava yolu isterse uçuş bölgesinin riskli olma durumuna göre (terör, savaş vb.) ilave olarak %2 oranında sigorta primi ödeyebilir. Bazı hava yolları, uçağın amortisman giderinin fazla olduğu durumda, uçağı, uçuş donanımını ve ekibini kiralama yoluna gider [89, 90].

Doğrudan işletme maliyetleri içerisinde önemli maliyetlerden biri de bakım ve onarım maliyetleridir. Teknik ekip, yedek parça ve bakım yönetimi maliyetleri bu maliyetler içerisinde ele alınır. Uluslararası Sivil Havacılık Otoritesi’ne (ICAO) ve İngiltere Sivil Havacılık Otoritesi’ne (CAA) göre, bakım ve onarım maliyetleri bir bütün

olarak ele alınır. Amerika Sivil Havacılık Otoritesi'ne (FAA) göre ise bakım maliyetleri, doğrudan uçak gövdesi üzerinde yapılan bakım, doğrudan motor bakımı ve genel (ağır) bakım şeklinde ele alınır. Bakım yönetimi maliyeti ise, genel bakım içerisinde yer alır.

Doğrudan işletme maliyetleri içerisinde bir diğer maliyet kalemi de amortisman maliyetleridir. Amortisman, yıpranma payı ya da değer düşmesi olarak da bilinir. Uçaklarda yıllık amortisman maliyeti denklem (4.39)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Yıllık Amortisman Maliyeti = \frac{Uçağın Fiyatı - Net değer}{Amortisman Süresi} \quad (4.39)$$

(Net değer = Net değer yüzdesi \* Uçağın fiyatı)

Eşitlikte yer alan net değer (residual value) hesaplanmasında net değer yüzdesi, uçaklar için genellikle %0-%15 arasında değişir. Net değer, amortismanlar çıktıktan sonraki değer olarak ifade edilir. Net değere bir örnek vermek gerekirse; 100.000 TL' ye yeni bir araç alındığı varsayalım ve bu araç 5 yıl 60.000 km kullanıldıktan sonra 50.000 TL' ye satılmış olsun. Bu aracın net değeri, 50.000 veya yüzde olarak %50'dir. Eşitlikte yer alan diğer büyüklük amortisman süresidir ve amortisman süresi uçağın kendi değerini karşılama süresidir. Eski tip uçaklarda veya 1970'den önce amortisman süresi 12 yıl veya daha düşüktür. 1970'den sonra jet motorlu büyük uçaklar ortaya çıkmıştır. Jet motorlu geniş gövdeli uçaklar için amortisman süresi 14-16 yıl olarak alınır. Yüzde olarak uçaklarda net değer, yaklaşık %10 civarında alınır [89].

Örneğin; bir havayolu B747-400 uçağını 140 milyon dolara satın almışsa, net değeri %10 ve amortisman süresi de 15 yıl olarak kabul edilirse bu uçağın yıllık amortisman maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Yıllık Amortisman Maliyeti = \frac{140 - 140 * \%10}{15} = \frac{140 - 14}{15} = \frac{126}{15} = 8.4$$

Söz konusu uçağın yıllık amortisman maliyeti 8.4 milyon dolardır.

Bir uçağın saatlik amortisman maliyeti yıllık amortisman maliyetinin uçağın yıl içerisinde yapmış olduğu uçuş saatine bölünmesiyle elde edilir. Yukarıda verilen örnekte yer alan uçak 3500 saat uçuş yaparsa saatlik amortisman maliyeti aşağıdaki gibi bulunur.

$$Saatlik Amortisman Maliyeti = \frac{8400000}{3500} = 2400$$

Uçağın saatlik amortisman maliyeti 2400 dolardır.

#### **4.6.1.2. Dolaylı işletme maliyetleri**

Dolaylı işletme maliyetleri; terminal ve yer hizmetleri maliyetleri, yolcu hizmet maliyetleri, biletleme, satış ve promosyon maliyetleri, genel ve yönetsel maliyetler ve diğer işletme maliyetlerini kapsar. Terminal ve yer hizmetleri maliyetleri içerisinde yer personelinin maaşları, bina, donanım ve ulaşım maliyetleri ile eğer yer hizmeti özel bir firmadan sağlanıyorsa firmaya ödenen hizmet bedeli gibi giderler yer alır. Kabin ekibinin ücret ve harcamaları, yolcu sigorta giderleri ile diğer yolcu hizmet giderleri ise yolcu hizmet maliyetleri içerisinde ele alınır. Kabin ekibinin personel sayısı, uçağın tipine göre değişiklik göstereceğinden kabin ekibi ücret ve harcama maliyetleri doğrudan işletme maliyetinin bir kalemi olarak da ele alınabilir. Dolaylı işletme maliyetlerinin diğer kalemlerini ise biletleme, satış ve promosyon giderleri, genel ve yönetsel giderler ile diğer işletme giderleri oluşturur [89, 90].

#### **4.6.2. Havayolu taşımacılığında kullanılan uçak tipleri**

Havayolu yük taşımacılığı yapan havayolu firmaları yük taşıma işlemlerini tarifeli uçuşlar ve tarifersiz uçuşlar şeklinde yapmaktadır. Tarifeli uçuşlar, yolcu taşımacılığında olduğu gibi belirli güzergâhlara belirli saatlerde yapılan uçuşlardır. Tarifersiz uçuşlar ise herhangi bir saatte müşterinin istediği güzergâha yapılan uçuşlardır. Tarifersiz uçuşlar, taşıma firmasının uçağı kiralaması (charter uçuşlar) şeklinde gerçekleştirilir. Havayolu firmaları, kargo uçakları ile tarifeli ve tarifersiz yük taşımacılığı yapmalarının yanı sıra, uçağı etkin bir şekilde kullanma amacıyla yolcu uçakları ile yük de taşırlar.

Dünyada ve ülkemizde havayolu yük taşımacılığı yapan çeşitli firmalar incelendiğinde Airbus A300, A330 ya da Boeing 747, 757, 767 tipi kargo uçaklarının kullanıldığı görülmüştür. Çizelge 4.1'de yük taşımacılığı yapan çeşitli havayolları ve kullandıkları uçak tipleri görülmektedir. Diğer ülkelere oranla havacılığın daha gelişmiş olduğu Amerika'daki Fedex ve UPS gibi firmalar incelendiğinde MD11 tipi uçakların da kullanıldığı görülür. Ayrıca Fedex ve DHL gibi firmalar bölgesel yük taşımacılığında büyük uçakların yanı sıra Fokker ve Cessna gibi küçük uçakları da kullanırlar [91-102].

**Çizelge 4.1. Yük Taşımacılığı Yapan Çeşitli Havayolları ve Kullandıkları Uçak Tipleri**  
[91–101].

<b>Firma</b>	<b>Uçak Tipi</b>
THY	A310-300F WL
	A330-200F
	A330-200F WL
MNG	A300-B4
	A300-600
	B737-4K5
	A330-243F
myCargo	B747-400BDSF
	B747-400ERF
	B747-400F
ULS	A310-300F
Lufthansa	MD11-F
	B777F
Air France KLM	B747
	B777
Fedex	B757F
	B767F
	B777F
	MD10-30F
	MD11-F
	A300-600F
UPS	B747-400
	B757-200
	B767-300
	A300-600
Qatar Airways Cargo	MD11-F
	B747-400F
	B777
Swiss World Cargo	A330
	A330-300
	A340-300
Ethiad Airways	B777-300ER
	A330-200F
	B747-8F
	B777-200F

Çalışmanın uygulama bölümünde; büyük geniş gövdeli uçak tipi olarak THY'nin yük taşımacılığında yoğun olarak kullandığı Airbus A330-200F ile myCargo firmasının kullandığı Boeing 747-400ERF uçak tipleri dikkate alınmıştır. Çalışmada ayrıca satın alma maliyetinin düşük olması açısından özellikle bölgesel uçuşlarda ve yükün az olduğu durumlarda Fedex ve DHL gibi firmaların tercih ettiği Cessna Super Cargomaster Ex uçağı kullanılmıştır [97, 102]. Çalışmada dikkate alınan uçakların özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir [103-106].

**Çizelge 4.2.** Çalışmada Kullanılan Uçak Tiplerinin Özellikleri [103–106].

Özellikler	Airbus A330-200F	Boeing 747-400ERF	Cessna Super Cargomaster Ex
Menzil (km)	7400	9230	1685
Düz Uçuş Hızı (km/h)	35 000 ft irtifada 876	35 000 ft irtifada 896	25 000 ft irtifada 324
(kts)	473	484	175
Maksimum Kalkış Ağırlığı (ton)	233	412	4
Faydalı Yük (ton)	65	112	1.6
Maksimum Yakıt Kapasitesi (l)	97 530	204 350	1269
Motor Türü	CF6-80E1A2	PW 4062	PT6A-140

#### 4.6.3. Uçakların yakıt maliyeti

Çalışmada uçakların harcadıkları yakıt miktarları, Çizelge 4.3'de gösterilen motor tipleri dikkate alınarak LTO döngüsü esnasında yakılan yakıt miktarı ile düz uçuş (Cruise) esnasında yakılan yakıt miktarı toplanarak belirlenmiştir [107, 108]. LTO döngüsü esnasında harcanan yakıt miktarı ICAO dokümanı, düz uçuş sırasında harcanan yakıt miktarı ise Eurocontrol'un BADA dokümanı kullanılarak hesaplanmıştır [107, 108]. ICAO, LTO yakıt verilerini motor türüne göre Eurocontrol BADA düz uçuş yakıt verilerini uçak tipine göre vermiştir.

**Çizelge 4.3. Uçak Tipine Göre Kullanılan Motor Tipi ve Sayısı**

Uçak Tipi	Motor Tipi
Airbus A330-200F	2 Adet CF6-80E1A2
Boeing 747-400ERF	2 Adet PW 4062
Cessna Super Cargomaster Ex	1 Adet PT6A-140 (Turboprop)

LTO döngüsü; rölanti (idle), kalkış-tırmanma ve yaklaşma olarak ele alınmaktadır. LTO döngüsünde geçen süreler ICAO dokümanından elde edilmiş ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

**Çizelge 4.4. LTO Esnasındaki Süreler**

LTO Süreleri (dk)	
Kalkış (Take-Off)	0.7
Tırmanma (Climb-Out)	2.2
Yaklaşma (Approach)	4
Rölanti (Idle)	26
<b>Toplam Süre</b>	<b>32.9</b>

LTO esnasında harcanan yakıt miktarı sabit maliyettir. Çünkü motor türüne göre değişiklik gösterir, uçulan mesafeye göre değişiklik göstermez ve uçak kullanıldığında ortaya çıkar, sabittir. Çalışmada da LTO döngüsü sırasında harcanan yakıtın maliyeti sabit maliyet içerisine dâhil edilmiştir.

Bir uçağın bir güzergâhta düz uçuş süresi; toplam uçuş süresinden rölanti ve LTO’da harcanan süreler çıkarılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir. ICAO’ya göre kalkış-tırmanma ve yaklaşma sürelerinin toplamı yaklaşık 6.9 dk, rölanti süresi ise 26 dk’dır. Bu süre verileri kullanılarak ve motor tipleri dikkate alınarak yakıt maliyeti yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Bir uçuşta harcanan yakıt miktarının hesaplanmasına yönelik bir örneğe aşağıda yer verilmiştir.

Örnek: Ankara-Elazığ arası uçuş mesafesi 306 nm’dir. 1 nm = 1,852 km’dir. Buradan Ankara-Elazığ arası uçuş mesafesi 567 km olarak bulunur. Ankara-Elazığ güzergâhında Airbus A330-200F uçağının uçtuğu varsayıldığında düz uçuş süresi şu şekilde

hesaplanabilir. A330-200F uçağının ekonomik hızı 35000 ft irtifada (FL350) düz uçuşta 473 kts'dir. 1 kts = 1,852 km/h'dir. Dolayısıyla 473 kts = 876 km/h'dir. A330-200 uçağının Ankara-Elazığ arası uçuş süresi 567 km / 876 km/h = 0,65 h (39 dk) olarak bulunur. Bu 39 dk uçuş süresi uçağın rölantide olmadan doğrudan kalkış, tırmanış, düz uçuş ve iniş yaptığı süreyi kapsar. Bu süreden kalkış-tırmanma ve yaklaşma süreleri çıkarıldığında düz uçuş süresi kalır. Buna göre düz uçuş süresi 39-6.9 = 32.1 dk olarak bulunur.

Diğer yandan; uçuş süresi ile rölanti süresinin toplamı toplam uçuş süresini verir. Buna göre 39 dk+26 dk = 65 dk olarak bulunur.

Airbus A330-200F uçağı 2 adet CF6-80E1A2 motoru kullanmaktadır. ICAO'nun motor verilerine göre 1 adet CF6-80E1A2 motorunun LTO'da yakmış olduğu yakıt miktarı 942 kg'dır. 2 adet motorun ise 1884 kg'dır. Eurocontrol BADA'ya göre 35000 ft (FL350) irtifada düz uçuş (cruise) safhasında uçağın yakıt tüketimi 96,5 kg/dk'dır. Yukarıda Ankara-Elazığ düz uçuş süresini 32,1 dk olarak bulunmuştu. Buna göre Ankara-Elazığ arasında düz uçuş sırasında tüketilen yakıt miktarı 96,5 kg/dk x 32,1 dk = 3098 kg'dır. Toplam tüketilen yakıt miktarı ise LTO ve düz uçuşta tüketilen yakıt miktarlarının toplamına eşittir. Buna göre

Toplam yakıt miktarı = LTO + düz uçuş = 1884 kg + 3098 kg = 4982 kg olarak bulunur.

Yakıt miktarı kilogram cinsinden elde edilmiştir. Yakıt fiyatları varil üzerinden verilmektedir. Toplam yakıt maliyetini hesaplamak için öncelikle basit bir dönüşüm yapmak gerekir. Uçaklar Jet A1 adı verilen uçak yakıtını kullanırlar. Jet A1 yakıtının 15°C'deki yoğunluğu 0.804 kg/l'dir [109]. 10 Haziran 2016 tarihinde Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği IATA'ya göre Jet A1 yakıtının varil başına olan fiyatı 60 \$'dır [110]. 1 varil ise yaklaşık olarak 159 l'dir. 1 l Jet A1'in fiyatı ise 60 \$/159 l = 0.38 \$/l'dir. Jet A1 yakıtının yoğunluk değeri olan 0.804 kg/l kullanılarak 1 kg Jet A1 yakıtı 1 kg/0.804 kg/l =1.24 l olarak bulunur. Ankara-Elazığ arasında A330-200F uçağının düz uçuş esnasında tükettiği yakıt miktarı 3098 kg yukarıdaki ifadeden 1 kg Jet A1 yakıtının 1.24 l olduğu aynı zamanda 1 l yakıt 0.38 \$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre düz uçuşta 3098 kg harcanan yakıtın maliyeti 3098 x 1.24 l x 0.38 \$/l = 1460 \$ olur. LTO yakıt maliyeti ise 1884 x 1.24 l x 0.38 \$/l = 888 \$ olur. Ankara- Elazığ arası uçuş mesafesi 567 km'dir.

Düz uçuşta km başına düşen yakıt maliyeti Airbus A330-200 uçağı için 1460 \$/567 km = 2.6 \$/km olarak bulunmaktadır. Çalışmada birim mesafe başına taşıma maliyeti diğer uçaklar için de benzer şekilde hesaplanmış ve Çizelge 4.5'te verilmiştir [111].

**Çizelge 4.5. Birim Taşıma ve LTO Maliyeti**

Uçak Tipi	Taşıma Maliyeti (\$/km)	LTO Maliyeti (\$)
Airbus A330-200F	2.6	888
Boeing 747-400ERF	4.2	843
Cessna Super Cargomaster Ex	0.5	31

#### 4.6.4. Karayolu taşımacılığında kullanılan araç tipleri ve yakıt maliyeti

Ekol Lojistik firmasının yük taşımacılığında kullandığı karayolu araç tipleri panelvan, kamyonet, hafif kamyon ve kamyonudur. Araçların kapasiteleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Karayolu araçlarında hız olarak Karayolu Genel Müdürlüğü'nün şehirlerarası yollar için öngördüğü hız limiti esas alınmıştır.

**Çizelge 4.6. Kullanılan Karayolu Araç Tipleri ve Özellikleri**

Araç Tipi	Kapasite (ton)	Hız (km/h)
Panelvan	1.3	90
Kamyonet	1	90
Hafif Kamyon	3.4	90
Kamyon	13	90

Karayolu yük taşımacılığında kullanılan araç tiplerine ait maliyetler sabit maliyet, sürücü maliyeti, muavin maliyeti ve yakıt maliyetidir. Çizelge 4.7'de araç türlerine ait maliyetler görülmektedir. Söz konusu maliyetler ilgili firmadan alınmıştır. Diğer yandan çalışmada sürücü ve muavin maliyeti sabit maliyet içerisinde ele alınmıştır.

**Çizelge 4.7. Karayolu Araçlarına Ait Maliyetler**

Araç Türü	Sabit Maliyet (\$/gün)	Yakıt Maliyeti (\$/km)	Sürücü Maliyeti (\$/gün)	Muavin Maliyeti (\$/gün)
Panelvan	24	0,1	27	21
Hafif Kamyon	48	0,2	27	21
Kamyon	29	0,3	27	-
Kamyonet	25	0,2	27	21

#### 4.6.5. Matematiksel modellerde kullanılan parametreler

Bu bölümde matematiksel modellerde kullanılan maliyet, mesafe, talep, araç, depo ve süreler ile ilgili parametrelere değinilmiştir.

##### 4.6.5.1. Mesafe verileri

Çalışmada havayolu ve karayoluna ait gerçek mesafe verileri kullanılmıştır. Çalışmada uçağın aletli uçuş kurallarına göre uçtuğu varsayılmış ve RocketRoute internet sitesinden yararlanılarak mesafeler belirlenmiştir [112]. Karayolu mesafe verileri ise Google Map'ten yararlanılarak bulunmuştur [113].

##### 4.6.5.2. Seyahat süresi

Havayolu araçları için LTO'da geçen süre ve düz uçuş süresinin toplamı uçağın uçuşu gerçekleştirilmesi için gereken toplam seyahat süresini vermektedir. LTO süresi sabittir ve ICAO dokümanından elde edilmiştir. Düz uçuş süresi değişken olup Eurocontrol BADA dokümanındaki veriler kullanılarak düz uçuş mesafesinin düz uçuş hızına bölünmesiyle elde edilebilir [107, 108]. Karayolu araçları için ise seyahat süresi mesafenin ortalama hıza bölünmesiyle bulunabilir.

##### 4.6.5.3. Sabit maliyet

Araç kullanıldığında ortaya çıkan maliyet olarak bilinen sabit maliyet:  
Uçaklar için;

$$F_{tv} = \text{Doğrudan İşletme Maliyetleri} + \text{Dolaylı İşletme Maliyetleri} \quad (4.40)$$

Karayolu araçları için;

$$F_{tv} = \text{Sabit Maliyet} + \text{Sürücü Maliyeti} + \text{Muavin Maliyeti} \quad (4.41)$$

denklem (4.40) ve (4.41)'deki değerlerin elde edilmesinden oluşmaktadır.

Doğrudan ve dolaylı işletme maliyetleri belirlenirken MNG Hava Kargo işletmesinin verilerinden yararlanılmıştır. Firmanın gizlilik politikası gereği veriler bu bölümde sunulmamıştır [3].

#### **4.6.5.4. LTO maliyeti**

Uçağın kalkış-tırmanma-iniş esnasında harcamış olduğu yakıt maliyetidir. LTO maliyeti ICAO dokümanı esas alınarak uçağın kullanmış olduğu motor tipine göre hesaplanmıştır. ICAO'da LTO süresi standart olarak belirlendiği için LTO maliyeti mesafeden bağımsız sabit bir maliyettir. Ancak uçağın her bir müşteri noktasına iniş ve kalkışında oluşacak bir maliyet olduğu için ayrı bir maliyet olarak ele alınmıştır [108]. Örneğin uçak depo noktasından hemen sonra iki müşteri noktasına uğramış ve tekrar depo noktasına dönmüş ise uçak üç defa kalkış-iniş yapmıştır. Dolayısıyla üç LTO maliyeti amaç fonksiyonuna eklenmelidir.

#### **4.6.5.5. Birim taşıma maliyeti**

Çalışmada uçakların birim mesafe başına yakıt tüketimi Eurocontrol BADA dokümanından yararlanılarak bulunmuştur [107]. Karayolu araçları birim taşıma maliyetinin hesaplanmasında Ekol Lojistik Firmasından temin edilen yakıt maliyeti verileri kullanılmıştır [86].

#### **4.6.5.6. Ceza maliyeti**

Havayolu taşımacılığı karayolu taşımacılığına göre daha maliyetli bir taşımacılık türüdür. Aynı zamanda havayolu taşımacılığında maliyet uçağın taşıdığı yük miktarıyla ters orantılıdır. Uçağın taşıyacağı yük ne kadar fazlaysa maliyet azalmaktadır, uçağın taşıyacağı yük miktarı az ise maliyet artmaktadır. Havayolu taşımacılığında uçağın yük miktarına göre değişen bu maliyet türü ceza maliyeti ( $\beta_{kt}$ ) olarak çalışmada amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Gheysens, Golden ve Assad tarafından heterojen filolu araç rotalama probleminde ele alınan ve esnek zaman pencereli araç rotalama probleminde kullanılan ceza yaklaşım yöntemleri yapılan çalışmada çok depolu araç rotalama

problemine uyarlanmıştır [31, 114-119].  $\beta_{kt}$  hesaplanırken sezgisel olarak depolara ait olabilecek müşteri noktaları kümesi dikkate alınmıştır. Dikkate alınan müşteri noktaları kümesi ile ilişkili oldukları depolar arasında Clarke-Wright tarafından önerilen sezgisel bir algoritma olan tasarruf algoritması ile rotalar hesaplanmıştır [16]. Kapasitesinin tamamı yük ile dolu olan uçağın bütün müşteri noktalarına uğradığında ortaya çıkan rotalama maliyeti, sabit maliyet ve LTO maliyeti toplamı o depoya ait uçak türünün ceza maliyetini vermektedir. Denklem (4.42)'de ceza maliyeti matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$\beta_{kt} = \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{v=1}^{A_t} F_{tv} x_{kjt v} + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{v=1}^{A_t} L_{tv} x_{ijt v} + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} \sum_{v=1}^{A_t} \alpha_t c_{ijt} x_{ijt v} \quad \forall k, \forall t \quad (4.42)$$

#### 4.6.5.7. Araç sayısı

Çalışmada firmanın belirli ve bilinen bir araç filosuna sahip olduğu varsayılmıştır. Her bir araç türü için  $A_t$  değeri 10 olarak alınmıştır. Yani her bir araç türüne ait 10 aracın olduğu varsayılmıştır.

#### 4.6.5.8. Araç kapasitesi

Kullanılan uçakların faydalı yük kapasiteleri ve karayolu araçlarının kapasiteleri Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

**Çizelge 4.8. Araç türleri ve kapasiteleri**

No	Araç	Kapasite (kg)
1	Kamyonet	1000
2	Panelvan	1300
3	Hafif Kamyon	3400
4	Kamyon	13000
5	Cessna Super Cargomaster Ex	1600
6	Airbus A330-200F	65000
7	Boeing 747-400ERF	112000

#### 4.6.5.9. Araç kapasite oran parametresi

Kullanılan uçakların faydalı yük kapasitelerinin bire bölümünden elde edilen parametredir. Denklem (4.43)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$B_t = \frac{1}{Q_t} \quad t = p + 1, \dots, p + r \quad (4.43)$$

#### 4.6.5.10. Talep

Çalışmada Ekol Lojistik firmasının 02.04.2015 ve 22.05.2015 tarihleri arasındaki talep verilerinden 24.04.2015 tarihine ait bir günlük veri seti kullanılmıştır. Firmanın Türkiye'de 12 ve Avrupa'da 10 olmak üzere toplam 22 talep noktası vardır. Türkiye'de İstanbul ve Avrupa'da Köln olmak üzere iki depo noktası bulunmaktadır. Depo noktalarının talepleri yoktur. Ekol Lojistik firmasının gizlilik politikası gereği talep verileri sunulmamıştır.

#### 4.6.5.11. Menzil

Menzil havacılıkta kullanılan bir terimdir. Uçağın yakıt deposu dolu iken uçabileceği en uzak mesafeyi ifade eder.  $R_{ij}$  menzil matrisi belirlenirken uçaklar için uçak üreticisi tarafından belirlendiği menzil değeri kullanılmıştır. Karayolu araçları için ise ilgili güzergâhta en uzak mesafeden daha büyük bir değer menzil matrisine girilmiştir.

#### 4.6.5.12. Depo açma maliyeti

Depo noktası belli olmayan durumlarda aday depo noktaları arasından depo belirlenebilir. Bu belirlemede amaç fonksiyonu ve diğer kısıtlar yanında depo açma maliyeti belirleyici rol oynar. Depo açma maliyeti, aday depo noktalarının bulunduğu yerin gelişmişliğine, ulaşım kolaylığına, arsa fiyatlarına, nüfus yoğunluğu, depo büyüklüğü, depo türü (soğuk hava deposu, ecza deposu, ıtriyat deposu vb.) gibi değişkenlere bağlı olarak değişeceğinden depo açma maliyetinin belirlenmesi detaylı bir araştırma ve uzmanlık gerektirecektir. Böyle bir maliyet hesaplaması firma tarafından aday noktalar arasında yapılacak bir ön araştırma ile belirlenmelidir. Çalışmanın uygulama kısmında depo açma maliyeti \$10000 ve \$50000 olmak üzere iki değer dikkate alınarak yapılmıştır.

#### **4.6.5.13. Deponun kapasitesi**

Aday depo noktalarının yük depolama kapasitesini gösteren matristir. Çalışmanın uygulama kısmında aday depo noktalarının tüm müşterilerin talebini karşılayabilecek şekilde kapasite değeri verilmiştir.

#### **4.6.5.14. Hizmet süresi**

Her bir müşteri noktasına ne kadar sürede hizmet verilmesi gerektiğini belirleyen parametredir. Çalışmada sadece yük dağıtımını esas alındığı için bütün müşteri noktaları için bu değer  $1 h$  olarak alınmıştır.

#### **4.6.5.15. Servise en erken başlama zamanı**

Hizmet verilecek müşteri noktasında aracın en erken hizmete başlayacağı zamanı gösterir. Depolar için bu değer 0 (sıfır) olarak alınır. Yani  $a_1, \dots, a_m=0$ 'dır. Çalışmada bütün müşteri noktaları için bu değer 0 (sıfır) olarak alınmıştır.

#### **4.6.5.16. Servise en geç başlama zamanı**

Hizmet verilecek müşteri noktasında aracın en geç hizmete başlayacağı zamanı gösterir. Yapılan çalışmada dağıtımın bir gün içerisinde tamamlanması istendiği için müşteri noktaları için bu değer 24 h (yirmi dört saat) depolar için ise bu değer 48 h (kırk sekiz saat) olarak alınmıştır. Yani  $b_1, \dots, b_m = 48$  olacaktır. Çalışmadaki matematiksel modeller öncelikle bir gün içerisinde herhangi bir zaman kısıtlaması olmadan çözdürüldüğü için bütün müşteri noktaları için bu değer 24 h (yirmi dört saat) olarak alınmıştır. Bazı müşteri noktalarının taleplerinin 6 h (altı saat) gibi belirli bir sürede teslim edilmesi varsayıldığından bu müşteri noktaları için  $b_i$  değeri 6 (altı), diğerleri için ise 24 (yirmi dört) olarak alınmıştır.

## **5. MATEMATİKSEL MODELLERİN UYGULANMASI**

Bu bölümde geliştirilen matematiksel modellerin ilgili veriler ile uygulanması anlatılmış ve sonuçlar açıklanmıştır.

### **5.1. Matematiksel Model 1'in Uygulanması**

Matematiksel modellerin çözümünde Intel Core i7-4700MQ 2.40 Ghz işlemci ve 32 Gb Ram ve Windows 10 işletim sistemine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Ekol Lojistik firmasından 02.04.2015 ve 22.05.2015 tarihleri arasında elde edilen 24 şehrin talep verileri değerlendirilmiş olup, bunlar arasından 24.04.2015 tarihine ait bir günlük veri seti kullanılmıştır. GAMS 23.5.1 paket programının Cplex 12.2 çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür. Türkiye'den 13 şehir, Avrupa'dan 11 şehir olmak üzere toplam 24 şehrin tümünde havaalanı olduğu varsayılmıştır. 24 havaalanı içerisinde 22 havaalanı müşteri noktalarını, Türkiye'den İstanbul Sabiha Gökçen Havaalanı ve Avrupa'dan ise Bonn-Köln Havaalanı depo noktalarını ifade etmektedir. Çizelge 5.1'de depo noktası olan havaalanları, müşteri noktası olan havaalanları ve bunların ICAO kodları verilmiştir. Firmanın gizlilik politikasından dolayı bütün talepler verilmemiştir. Sadece belirli havaalanlarının talepleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 5.1. Havaalanları ve ICAO Kodları (Model-1)**

No	ICAO Kodu	Havaalanı
1	LTFJ	İstanbul
2	EDDK	Bonn/Köln
3	LTAC	Ankara
4	LTAI	Antalya
5	LTBD	Aydın
6	LTFD	Balıkesir
7	LTBR	Bursa
8	LTAY	Denizli
9	LTCA	Elazığ
10	LTBJ	İzmir
11	LTAU	Kayseri
12	LTBV	Muğla
13	LTAR	Sivas
14	LTBU	Tekirdağ/Çorlu
15	EDDT	Berlin
16	EDDW	Bremen
17	EDLW	Dortmund
18	EDDF	Frankfurt
19	EDNY	Friedrichshafen
20	EDQM	Hof/Plauen
21	EDSB	Karlsruhe
22	ELLX	Lüksemburg
23	EDDM	Münih
24	LIRN	Napoli

**Çizelge 5.2. Model-1 Veri Seti Talep Verileri**

No	ICAO Kodu	Havaalanı	Talep (kg)
1	LTFJ	İstanbul Sabiha Gökçen	0
2	EDDK	Köln	0
3	LTAC	Ankara	727
9	LTCA	Elazığ	2
10	LTBJ	İzmir	47
17	EDLW	Dortmund	3810
18	EDDF	Frankfurt	8447
21	EDSB	Karlsruhe	2808

Havaalanları arasındaki mesafe verileri RocketRoute web sayfasından, karayolu mesafeleri ise GoogleMaps uygulamasından yararlanılarak elde edilmiştir [112, 113]. Karayolu ve havayolu araçlarına ait kapasite bilgileri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Matematiksel model 1’in uygulama kısmında 24.04.2015 tarihine ait bir günlük veri seti kullanılmıştır. Diğer yandan ürün teslimatının aciliyetine göre 2 farklı senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryolar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Senaryo: Müşteri noktalarının acil yük taleplerinin olmadığı 24 saat içerisinde yükün teslim edilme durumu,
2. Senaryo: Rastgele seçilmiş olan Antalya, Elazığ, Tekirdağ/Çorlu, Berlin, Bremen, Napoli müşteri noktalarının taleplerinin 6 saat ve 6 saatten az bir sürede karşılanması ve kalan diğer müşteri noktalarının taleplerinin 24 saat içerisinde karşılanması durumudur.

Geliştirilen matematiksel model ve yukarıdaki senaryolara göre ilgili veriler GAMS programında kodlanmış ve program çalıştırılmıştır. Buna göre Çizelge 5.3’de yer alan sonuçlar elde edilmiştir. Veri setinin 1. senaryosuna göre (acil teslimi gereken yükün olmadığı durum) amaç fonksiyonu değerinin \$2145,4 olduğu görülmektedir. Bu senaryoda tüm talebin karşılanması için 6 farklı araç ile 6 farklı rota bulunmuştur. Atanan araçların tümü karayolu araçlarıdır. Rotalardan birine panelvan araç türünün 1. aracı atanmış olup bu aracın rotası 2-22-24-2 (Bonn/Köln-Lüksemburg-Napoli-Bonn/Köln) şeklinde belirlenmiştir.

2. senaryoya göre (belirli müşterilerin talebinin acil olduğu, teslim süresinin 6 saat veya daha düşük olduğu durum) amaç fonksiyonu değerinin \$23458,54 olduğu görülmektedir. Bu senaryonun sonuçlarına göre 5 rotaya 5 farklı araç atanmıştır ve bu araçlar karayolu ve havayolu araçlarıdır. Yükün teslim süresi kısaldıkça atama yapılan rota sayısının azaldığı aynı zamanda rotalara uçakların atandığı ve dolayısıyla maliyetin de arttığı görülmektedir. Diğer yandan rotalar ve müşteriler incelendiğinde teslimatı acil olmayan durumda ilgili rotalara karayolu araçları atanırken, teslimatı acil olan durumda ilgili rotalara uçakların atandığı görülmektedir. Her iki senaryoya göre elde edilen çözümler matematiksel modelin yerel uygun çözümlerinden biridir. Matematiksel model 1’de kullanılan toplam karar değişkeni sayısı 42212, kısıt sayısı ise 60367’dir (EK-3, 4).

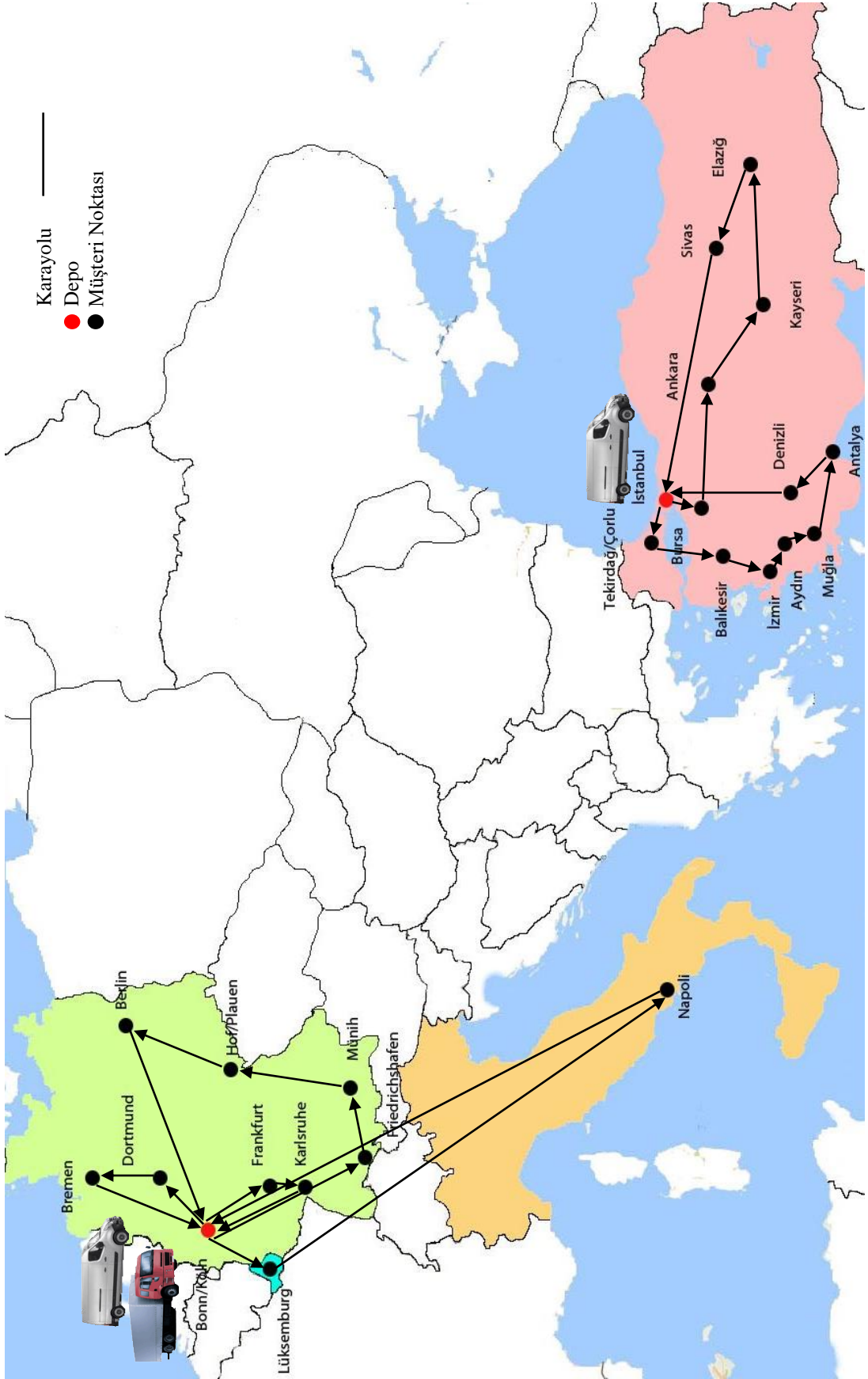
**Çizelge 5.3. Matematiksel Model 1 GAMS Sonuçları**

Senaryo	Araç Türü	Araç	Rotalar	Amaç Fonk. (\$)	Yerel Uygun Çözüm Süresi (s)
1	2	1	2-22-24-2	2145,4	5000
	2	2	1-7-3-11-9-13-1		
	2	3	1-14-6-10-5-12-4-8-1		
	4	1	2-18-21-2		
	4	2	2-17-16-2		
	4	3	2-19-23-20-15-2		
2	2	1	1- <b>14</b> -5-12-10-6-1	23458,54	9000
	4	1	2-17- <b>16</b> -23-21-2		
	5	1	1- <b>4-9</b> -13-11-3-8-7-1		
	5	2	2-19- <b>24</b> -22-2		
	6	1	2- <b>15</b> -20-18-2		

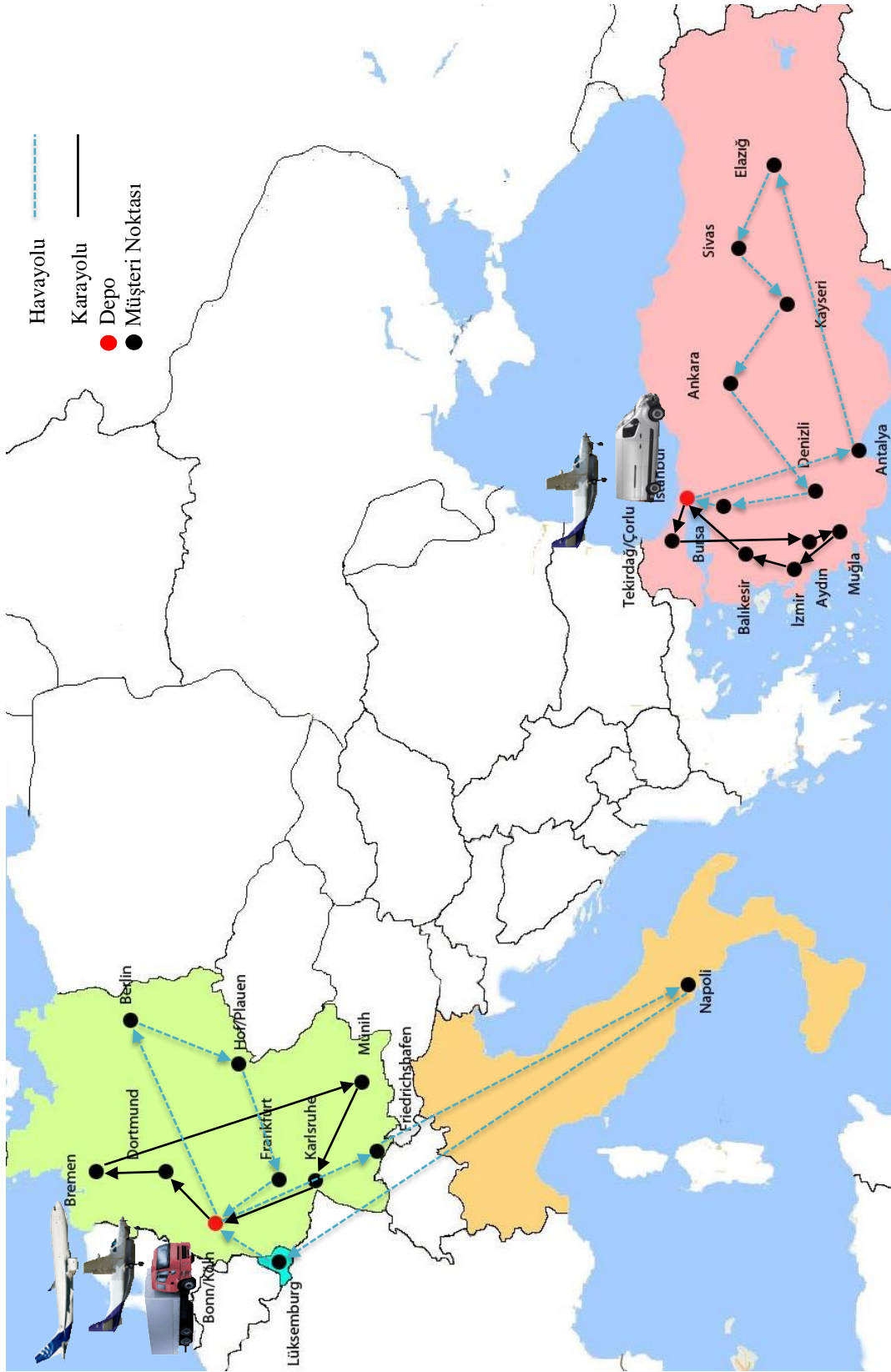
\* Araç türleri Model-1 GAMS Sonuçları içerisinde 1-4 arası karayolu araçlarını, 5-7 arası havayolu araçlarını göstermektedir.

\* Acil talebi olan müşteri noktaları koyu renkle belirtilmiştir. Bu müşteri noktaları:

- 4-Antalya
- 9-Elazığ
- 14-Tekirdağ/Çorlu
- 15-Berlin
- 16-Bremen
- 24-Napoli



Şekil 5.1. Matematiksel Model 1 Senaryo 1 Rotalar



Şekil 5.2. Matematiksel Model 1 Senaryo 2 Rotalar

## 5.2. Matematiksel Model 2'nin Uygulanması

Çalışmanın bu bölümünde matematiksel model 2 GAMS'e kodlanmış ve ilgili model veri seti kullanılarak çözdürülmüştür. Veri setinde 24 noktadan 4'ü aday depo noktası, kalan 20 nokta ise müşteri noktaları olarak belirlenmiştir. Aday depo noktaları; İstanbul Sabiha Gökçen Havaalanı, Bonn-Köln Havaalanı, Ankara Esenboğa Havaalanı ve Dortmund Havaalanıdır. Çizelge 5.4'de aday depo noktası olan havaalanları, müşteri noktası olan havaalanları ve bunların ICAO kodları görülmektedir. Firmanın gizlilik politikasından dolayı bütün talepler verilmemiş, Çizelge 5.5'de bazı havaalanlarının talepleri verilmiştir.

**Çizelge 5.4. Havaalanları ve ICAO Kodları (Matematiksel Model 2)**

No	ICAO Kodu	Havaalanı
1	LTFJ	İstanbul
2	EDDK	Köln
3	LTAC	Ankara
4	EDLW	Dortmund
5	LTAI	Antalya
6	LTBD	Aydın
7	LTFD	Balıkesir
8	LTBR	Bursa
9	LTAY	Denizli
10	LTCA	Elazığ
11	LTBJ	İzmir
12	LTAU	Kayseri
13	LTBV	Muğla
14	LTAR	Sivas
15	LTBU	Tekirdağ/Çorlu
16	EDDT	Berlin
17	EDDW	Bremen
18	EDDF	Frankfurt
19	EDNY	Friedrichshafen
20	EDQM	Hof/Plauen
21	EDSB	Karlsruhe
22	ELLX	Lüksemburg
23	EDDM	Münih
24	LIRN	Napoli

**Çizelge 5.5. Matematiksel Model 2 Veri Seti Talep Verileri**

No	ICAO Kodu	Havaalanı	Talep (kg)
1	LTFJ	İstanbul Sabiha Gökçen	0
2	EDDK	Köln	0
3	LTAC	Ankara	0
4	EDLW	Dortmund	0
10	LTCA	Elazığ	2
11	LTBJ	İzmir	47
18	EDDF	Frankfurt	8447
21	EDSB	Karlsruhe	2808

Matematiksel model 2’de aynı matematiksel model 1’de olduğu gibi 2 farklı senaryo üzerinde çalışılmıştır. Depo açma maliyeti olarak \$10000 ve \$50000, 2 farklı senaryo ile birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen model ve yukarıdaki senaryolara göre ilgili veriler GAMS programında kodlanmış ve program çalıştırılmıştır. Buna göre Çizelge 5.6’da yer alan sonuçlar elde edilmiştir.

Depo açma maliyeti \$10000 olan 1. senaryoya göre (acil teslimi gereken yükün olmadığı durum) depoların 1, 2 (İstanbul, Bonn/Köln) olarak seçildiği amaç fonksiyonu değerinin \$22239 olduğu görülmektedir. Bu senaryoda tüm talebin karşılanması için 7 farklı araç ile 7 farklı rota bulunmuştur. Atanan araçların tümü karayolu araçlarıdır. Rotalardan birine panelvan araç türünün 1. aracı atanmış olup bu aracın rotası 2-22-24-2 (Bonn/Köln-Lüksemburg-Napoli-Bonn/Köln) şeklinde belirlenmiştir. Depo açma maliyeti \$10000 olan 2. senaryoya göre (belirli müşterilerin talebinin acil olduğu, teslim süresinin 6 saat veya daha düşük olduğu durum) depoların 3, 4 (Ankara, Dortmund) olarak seçildiği amaç fonksiyonu değerinin \$28713,3 olduğu görülmektedir. Bu senaryonun sonuçlarına göre 7 rotaya 7 farklı araç atanmıştır. Bu araçların dördü karayolu ve üçü ise havayolu araçlarıdır.

Depo açma maliyeti \$50000 olan 1. senaryoya göre (acil teslimi gereken yükün olmadığı durum) depoların 3, 4 (Ankara, Dortmund) olarak seçildiği amaç fonksiyonu değerinin \$102355,2 olduğu görülmektedir. Bu senaryoda tüm talebin karşılanması için 8 farklı araç ile 8 farklı rota bulunmuştur. Atanan araçların tümü karayolu araçlarıdır. Rotalardan birine panelvan araç türünün 1. aracı atanmış olup bu aracın rotası 4-22-4 (Dortmund-Lüksemburg-Dortmund) şeklinde belirlenmiştir. Depo açma maliyeti \$50000

olan 2. senaryoya göre (belirli müşterilerin talebinin acil olduğu, teslim süresinin 6 saat veya daha düşük olduğu durum) depoların 3, 4 (Ankara, Dortmund) olarak seçildiği amaç fonksiyonu değerinin \$105660,6 olduğu görülmektedir. Bu senaryonun sonuçlarına göre 8 rotaya 8 farklı araç atanmıştır. Bu araçların beşi karayolu ve üçü ise havayolu araçlarıdır.

Depo açma maliyeti \$10000 ve \$50000 her iki senaryoya göre kıyaslandığında depo açma maliyeti arttıkça ve yükün teslim süresi kısaldıkça rotalara uçakların atandığı dolayısıyla maliyetin de arttığı görülmektedir. Diğer yandan rotalar ve müşteriler incelendiğinde teslimatı acil olmayan durumda ilgili rotalara karayolu araçları atama yapılırken teslimatı acil olan durumlarda ilgili rotalara uçakların atandığı görülmektedir. Her iki senaryoya göre elde edilen çözümler matematiksel modelin yerel uygun çözümlerinden biridir. Matematiksel model 2’de kullanılan toplam karar değişkeni sayısı 42264, kısıt sayısı ise 57631’dir (EK-5-8).

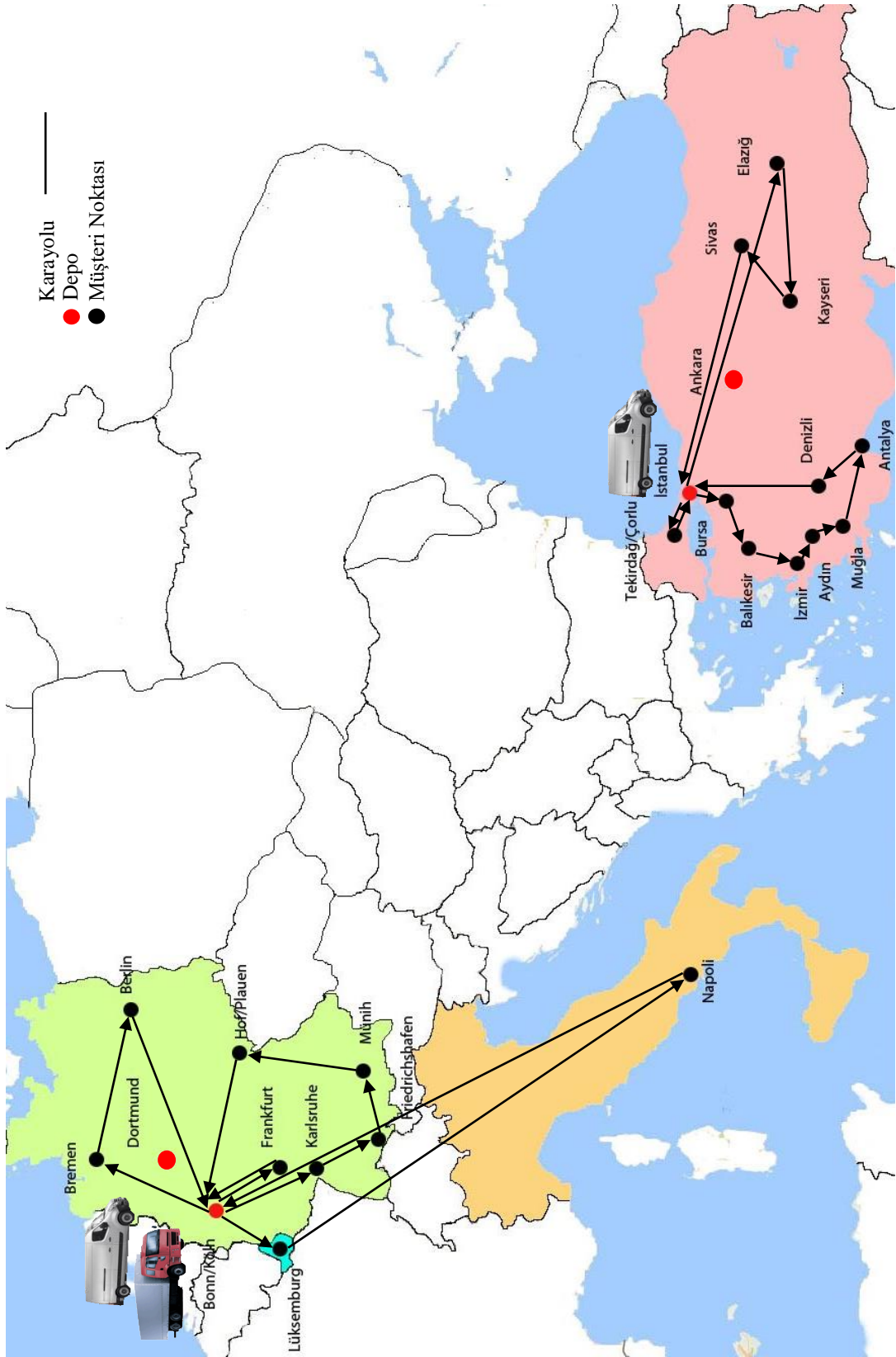
**Çizelge 5.6. Matematiksel Model 2 GAMS Sonuçları**

Senaryo	Depo Maliyeti (\$)	Seçilen Depolar	Araç Türü	Araç	Rotalar	Amaç Fonk. (\$)	Yerel Uygun Çözüm Süresi (s)
1	10000	1, 2	2	1	2-22-24-2	22239	5000
			2	2	1-15-1		
			2	3	1-10-12-14-1		
			2	4	1-8-7-11-6-13-5-9-1		
			4	1	2-18-2		
			4	2	2-17-16-2		
			4	3	2-21-19-23-20-2		
	50000	3, 4	2	1	4-22-4	102355,2	2500
			2	2	3-15-8-3		
			2	3	3-12-10-14-3		
			2	4	4-24-4		
			2	5	3-9-5-13-6-11-7-3		
			4	1	4-16-17-4		
			4	2	4-18-4		
2	10000	3, 4	4	3	4-21-19-23-20-4	28713,2	3000
			2	1	3-5-12-3		
			4	1	4-17-4		
			4	2	4-16-20-23-4		
			4	3	4-21-18-4		
			5	1	3-8-15-7-11-6-13-9-3		
			5	2	3-10-14-3		
	5	3	4-24-19-22-4				
	50000	3, 4	2	1	3-14-12-3	105660,6	3000
			2	2	3-5-13-6-11-7-9-3		
			3	1	4-17-4		
			4	1	4-18-21-4		
			4	2	4-16-20-23-19-22-4		
			5	1	3-10-3		
5			2	4-24-4			
5	3	3-15-8-3					

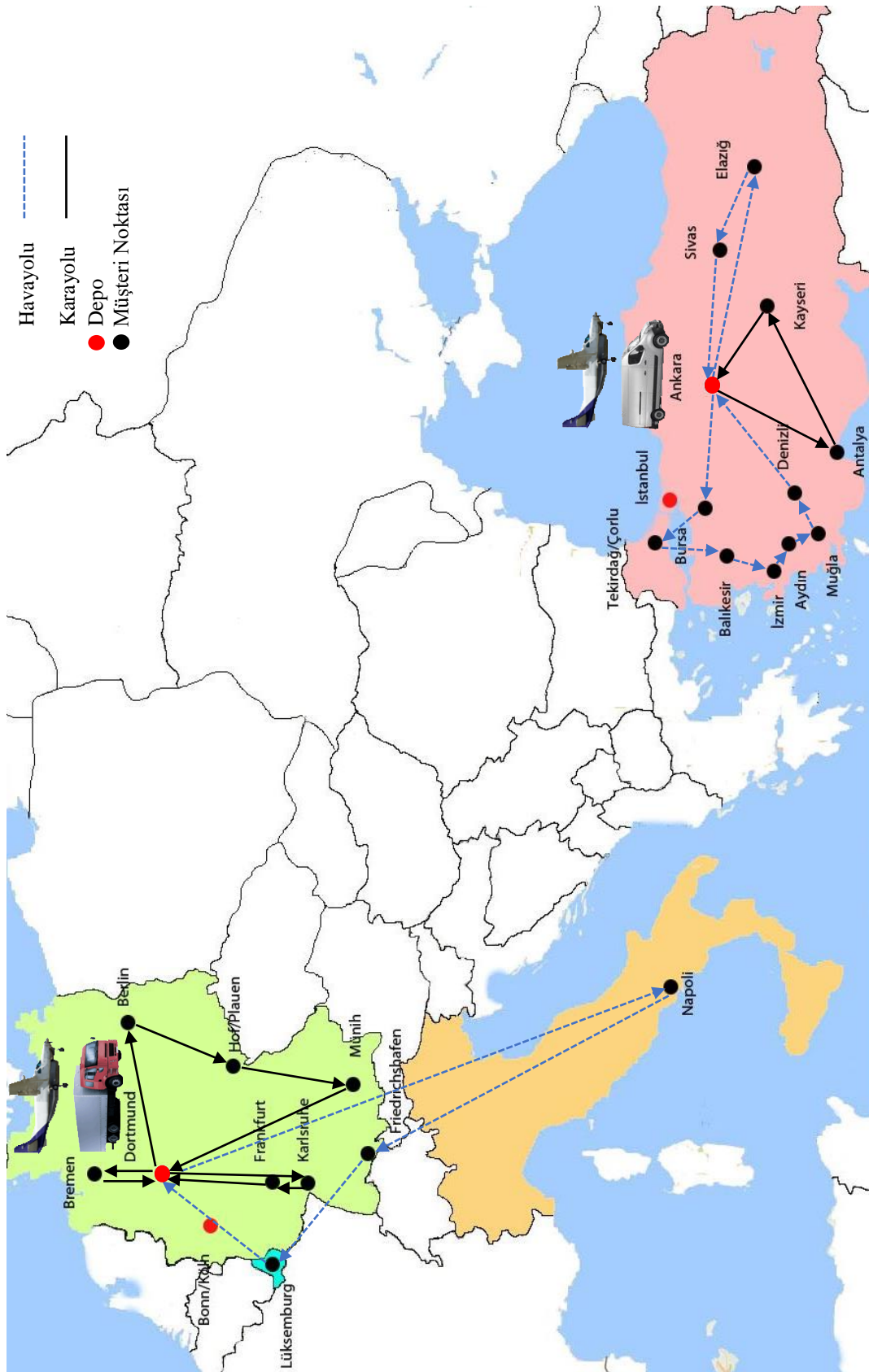
\* Araç türleri içerisinde 1-4 arası karayolu araçlarını, 5-7 arası havayolu araçlarını göstermektedir.

\* Acil talebi olan müşteri noktaları koyu renkle belirtilmiştir. Bu müşteri noktaları:

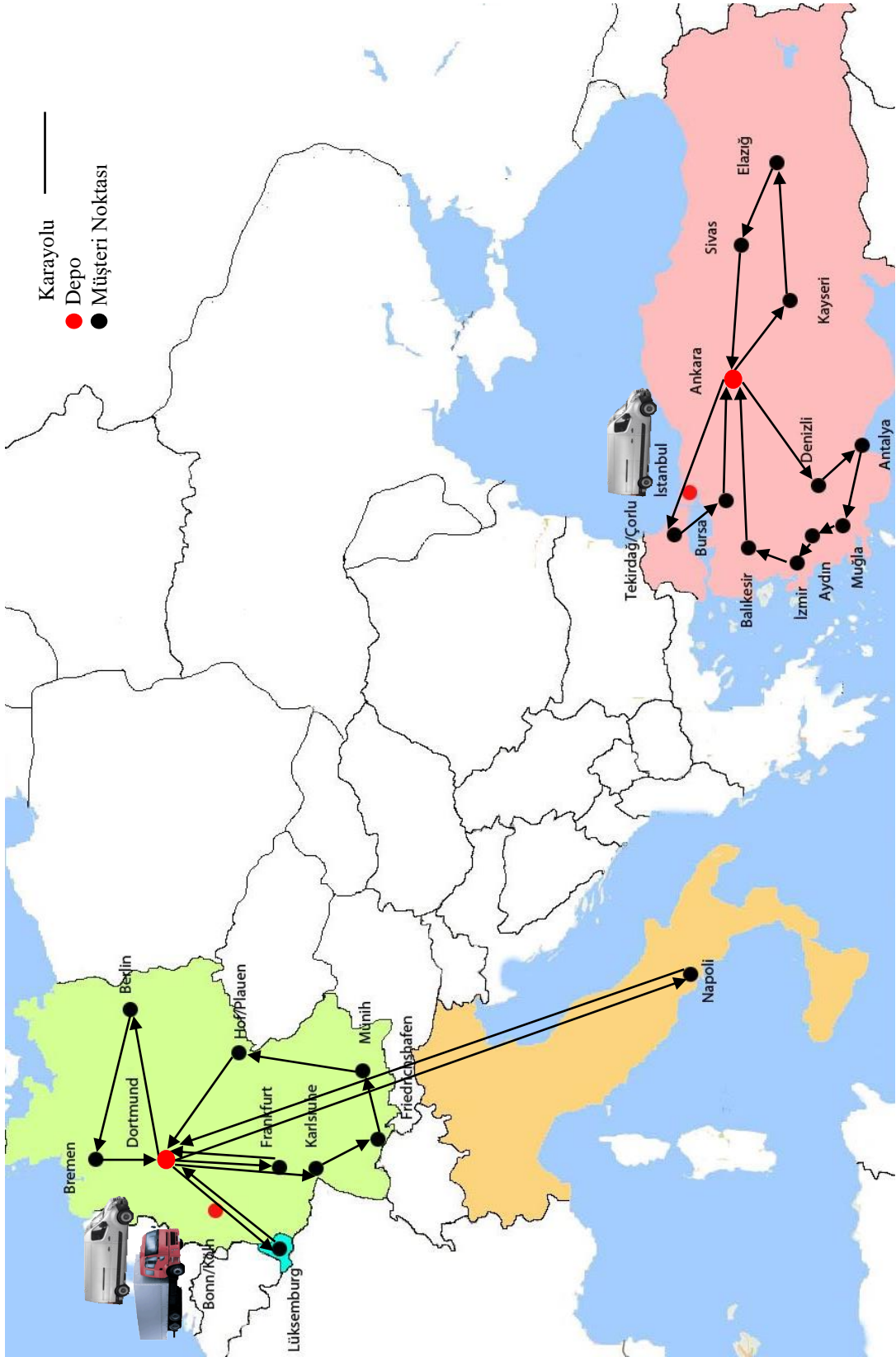
- 5-Antalya
- 10-Elazığ
- 15-Tekirdağ/Çorlu
- 16-Berlin
- 17-Bremen
- 24-Napoli



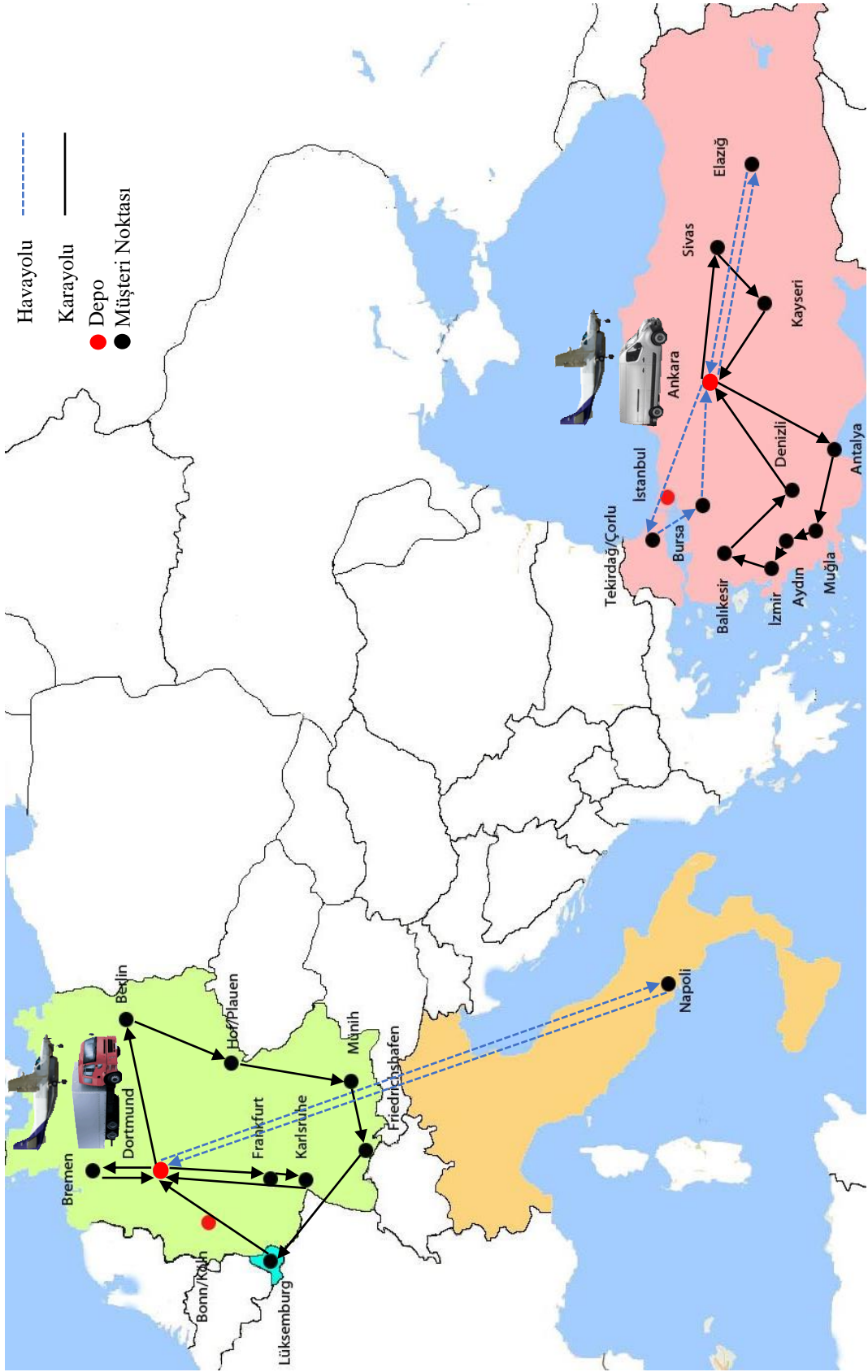
Şekil 5.3. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$10000)



Şekil 5.4. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$10000)



Şekil 5.5. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$50000)



Şekil 5.6. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 Rotalar (Depo Açma Maliyeti \$50000)

Çalışmada, ÇDHFZPARP'ye yönelik karma tamsayı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modeller GAMS paket programı aracılığıyla çözülmüştür. Çalışmada proje paydaşı olan Ekol Lojistik firmasının isteği doğrultusunda depo noktalarının bilindiği bir ağ yapısı için ÇDHFZPARP'ye yönelik matematiksel model geliştirilmiştir. Ayrıca aynı problem için, depo noktalarının model tarafından belirlendiği ikinci bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen ikinci model ile probleme yönelik genelleştirilmiş bir matematiksel model elde edilmiştir.

Çalışmada, karayolu ve havayolu için farklı araç türleri kullanılmıştır. Karayolu aracı olarak firmanın filosunda bulunan farklı yük kapasitesine ve özelliklere sahip kamyonet, panelvan, hafif kamyon ve kamyon kullanılmıştır. Havayolu aracı olarak ise, Türkiye'de ve dünyada kargo taşımacılığında yaygın olarak kullanılan Cessna Super Cargomaster Ex, Airbus A330-200F ve Boeing 747-400ERF uçakları kullanılmıştır.

Mesafe maliyet matrisi, karayolu ve havayoluna ait gerçek mesafe verileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Karayoluna ait mesafeler için GoogleMaps kullanılarak en kısa yollar belirlenmiştir. Havayoluna ait mesafeler için ise, RocketRoute kullanılarak en kısa rotalar belirlenmiştir.

Karayolu araçları için sabit maliyet verileri Ekol Lojistik firmasından alınmıştır. Havayolu araçları için doğrudan maliyetlerin tamamı ile dolaylı maliyetlerin bir kısmı sabit maliyet olarak ele alınmıştır. Birim taşıma maliyeti ise, uçağın düz uçuş sırasında sarf ettiği yakıt maliyeti olarak hesaplanmıştır. Her iki maliyet için ICAO, BADA dokümanlarından ve MNG Havayolu İşletmesi'nin verilerinden yararlanılmıştır.

Birinci matematiksel model için 2 depo ve 22 müşteri noktasından oluşan toplam 24 havaalanı, düğüm noktası olarak alınmıştır. İkinci matematiksel modelde ise, toplam 24 havaalanı içerisinde, 4 aday depo noktası ve 20 havaalanı müşteri noktası olarak alınmıştır. Havaalanlarına ait talep verileri, Ekol Lojistik firmasından elde edilmiştir.

Her iki matematiksel modele, uçakların yakıt deposu dolu iken en fazla uçabilecekleri mesafe olan menzil kısıtı eklenmiştir. Menzil değeri uçak tipine, motoruna, uçağın yakıt deposuna, dış ortam gibi şartlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Menzil değeri için uçak üreticilerinden elde edilen gerçek menzil verisi kullanılmıştır.

Gerçek hayatta genellikle, taşınan yükün teslim süresi önemlidir. Ayrıca, zamanında teslim edilmeyen yükler firmaya ilave maliyete neden olmaktadır. Özellikle acil olarak teslim edilmesi gereken yük, bozulabilir gıda gibi yüklerden oluşuyorsa firmanın bu yükü zamanında ulaştırmasından başka alternatifi olmayacaktır. Çalışmada,

bu tip durumlar için zaman kısıtları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kısıtlar, sadece kargo ve yük taşımacılığında değil, aynı zamanda trafik kazalarında ambulansların kaza yerine zamanında sevk edilmesi, yangın durumunda en yakın itfaiye aracının yangın yerine ulaştırılması, organ nakli sırasında organın hızlı bir şekilde ulaştırılması gibi farklı ARP türleri ve uygulamalarda uygun düzenlemelerle kullanılabilir.

Talepler müşterilere teslim süresine bağlı olarak acil ve acil olmayan şeklinde sınıflandırılmıştır. Geliştirilen matematiksel modellerde, talebin teslim süresinin bir gün (24 h) olduğu durumda talebin acil olmadığı varsayılmıştır. Talebin teslim süresinin 6 h ve daha kısa olduğu durumda ise talebin acil olduğu varsayılmıştır. Geliştirilen matematiksel modeller GAMS paket programı aracılığıyla çözülmüştür. Acil olmayan taleplerin teslim süresi uzun olduğundan, geliştirilen matematiksel modeller, bu tür yüklerin taşınmasında genellikle düşük maliyetli olan karayolu araçlarını atamıştır. Matematiksel modeller, teslimatı acil olan yüklerin taşınması için, maliyeti yüksek de olsa uçakları atamıştır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Lojistik ve kargo işletmeleri için depo seçimi, filo planlaması ve filo içerisinde yer alan araçlara uygun rotaların seçilmesi zaman ve maliyet açısından pahalı yatırımlardır. İyi bir filo planlamasının yapılması ve araçların uygun rotalara atanması konularında verilecek kararların bilimsel bir gerçeğe dayandırılması oldukça önemlidir. Araçlar için uygun rotaların tespiti ARP olarak adlandırılmaktadır. ARP, günlük hayatta sıklıkla karşılaşılan ve çözülmesi zor olan problem türlerinden biridir. Literatürde, farklı ARP türlerine ait çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar arasında en az ele alınan problem türlerinden birinin ÇDHFZPARP olduğu görülmektedir. Yapılan çalışma ile ÇDHFZPARP'ye yönelik düğüm tabanlı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modellerin ÇDHFZPARP için önemli bir eksikliği gidereceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, literatürde hem karayolu hem de havayolu araçlarının birlikte kullanıldığı her hangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle çalışmanın söz konusu alandaki boşluğu giderebileceği düşünülmektedir. Özellikle çalışmanın havacılık alanında yapılması çalışmayı önceki çalışmalardan ayırmaktadır. Havacılık ile ilgili maliyet ve kriterlerin ortaya konulması, gerçek talep verilerinin kullanılması, gerçek uçuş mesafeleri ve karayolu mesafelerinin kullanılması açısından çalışma farklılık arz etmektedir. Yapılan çalışmada, havayolu taşımacılığındaki ve karayolu taşımacılığındaki kriterler göz önüne alınmıştır. Daha önce geliştirilen ARP modellerinin amaç fonksiyonunda ve kısıtlarında değişiklik yapılmış ve ARP modellerine yeni kısıtlar eklenmiştir. Böylece elde edilen ARP modelleri lojistik ve kargo firmaları için gerçekçi ve kullanılabilir hale getirilmiştir.

### Öneriler

- Çalışmada düğüm tabanlı matematiksel model geliştirilmiştir. Başka bir çalışmada ise, akış tabanlı matematiksel model geliştirilebilir ve iki model karşılaştırılabilir.
- Çalışmada taşıma türlerinden havayolu ve karayolu taşımacılığı esas alınmıştır. Denizyolu ve demiryolu taşımacılığı gibi diğer taşıma türlerinin de dikkate alındığı bir problem üzerinde çalışılabilir.
- Çalışmadaki matematiksel modeller, sabit maliyetler, uçaklar için kalkış-iniş maliyetleri, ceza maliyetleri (uçaklar için), depo açma maliyetleri (matematiksel

model 2) ve rotalama maliyetleri toplamını en küçükleyen tek amaçlı amaç fonksiyonundan oluşmaktadır. Matematiksel modellere araç sayısının en küçüklendiği ikinci bir amaç fonksiyonu eklenerek çok amaçlı amaç fonksiyonu kullanılabilir.

- Geliştirilen matematiksel modellerde amaç fonksiyonunda bulunan sabit maliyetler, uçaklar için kalkış-iniş maliyetleri, ceza maliyetleri (uçaklar için), depo açma maliyetleri (matematiksel model 2) ve rotalama maliyetleri önem derecesine göre bir katsayı ile çarpılarak ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonu kullanılabilir.
- Çalışma, rotalama açısından araçların yüklerini bıraktıktan sonra tekrar depolarına döndüğü kapalı uçlu bir rotadan oluşmaktadır. Firmaların araç kiralama maliyetleri göz önüne alınarak açık uçlu rotalamanın yapılabileceği çok depolu açık uçlu heterojen filolu zaman pencereli araç rotalama problemi için matematiksel model geliştirilebilir.
- Çalışmada müşterilerin yük talebi ağırlık biriminden (kg) değerlendirilmiştir. Yük talebi hacim (desi) olarak da değerlendirilebilir.
- Çalışmada yük talebinin bölünemediği varsayılmıştır. Yük talebinin bölünebilirliği göz önüne alınarak çok depolu heterojen filolu zaman pencereli bölünebilir talepli araç rotalama problemi için matematiksel model geliştirilebilir.
- Çalışmada sadece müşterilere dağıtılacak yük talebi dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra müşterilerin depoya gönderecekleri yük talebi de (arz) dikkate alınıp çok depolu heterojen filolu zaman pencereli eş zamanlı dağıt-topla araç rotalama problemi geliştirilebilir.
- Çalışmada geliştirilen matematiksel modeller 24 nokta için test edilmiştir. Daha büyük boyutlu veriler için de test edilebilir.
- Geliştirilen matematiksel modeller büyük boyutlu veriler için test edildiğinde çözüme ulaşamaması durumunda, matematiksel modellerin çözümünde genetik algoritma, yasaklı arama algoritması, karınca kolonisi gibi metasezgisel yöntemlerden yararlanılabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Altuntaş, M. (2007). Lojistikte Taşımacılık Modları ve Entegre Taşımacılık [http://www.ekodialog.com/Makaleler/lojistik\\_modlari\\_entegre\\_tasimacilik\\_makale.html](http://www.ekodialog.com/Makaleler/lojistik_modlari_entegre_tasimacilik_makale.html) (Erişim Tarihi: 06.10.2013).
- [2] Kurt, C. (2010). *Türkiye’de Ulaştırma Sektörü İçerisinde Lojistiğin Yeri ve Önemi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- [3] Özger, A. (2008). *Havayolu Kargo Taşımacılığında Ana Dağıtım Üssü Yerleşim Problemine Tamsayılı Model Yaklaşımı*. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [4] OECD, OECD Data. <https://data.oecd.org/transport/freight-transport.htm> (Erişim Tarihi: 13.12.2016)
- [5] USA Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistic. <http://www.transtats.bts.gov/freight.asp?pn=1> (Erişim Tarihi: 13.12.2016)
- [6] European Commission. (2016). *Statistical Pocketbook 2016- EU Transport in Figures*. Belgium-Bietlot: European Union.
- [7] World Bank, The World Bank Railway Data. <http://data.worldbank.org/indicator/IS.RRS.GOOD.MT.K6> (Erişim Tarihi: 13.12.2016)
- [8] World Bank, The World Bank Air Data. <http://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.GOOD.MT.K1>. (Erişim Tarihi: 13.12.2016)
- [9] DHMİ, DHMİ İstatistik. <http://www.dhmi.gov.tr/istatistik.aspx> (Erişim Tarihi: 13.12.2016)
- [10] Airbus, Airbus Forecast. <http://www.airbus.com/company/market/forecast/> (Erişim Tarihi: 06.10.2013)
- [11] Global Kargo, İnter Global Kargo. <http://www.globalkargo.com/kargo-tasimaciligi.aspx> (Erişim Tarihi: 06.10.2013)
- [12] <http://tkarabel.blogcu.com/kargo-sektoru-neden-onemli/8165726> (Erişim Tarihi: 06.10.2013)
- [13] Gürsoy, M. (2005). A Decision Supportive Method For Freight Transportation Mode Choice. *Sigma*, 2(212), 137–151.
- [14] Toth, P., Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia. ABD: SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.

- [15] Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6 (1), 80–92.
- [16] Clarke, G. and Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581.
- [17] Balinski, M. L. and Quandt, R. E. (1964). On an Integer Program for a Delivery Problem. *Operations Research*, 12(2), 300–304.
- [18] Fisher, M. L. and Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2), 109–124.
- [19] Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P. (1981). Exact Algorithms For The Vehicle Routing Problem, Based on Spanning Tree And Shortest Path Relaxations. *Mathematical Programming*, 20, 255–282.
- [20] Laporte, G. and Nobert, Y. (1983). A Branch and Bound Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *OR Spektrum*, 5, 77–85.
- [21] Laporte, G., Nobert, Y. and Desrochers, M. (1985). Optimal Routing under Capacity and Distance Restrictions. *Operations Research*, 33(5), 1050–1073.
- [22] Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E. and Mingozzi, A. (2004). An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation. *Operations Research*, 52(5), 723–738.
- [23] Baldacci, R., Toth, P. and Vigo, D. (2007). Recent advances in vehicle routing exact algorithms. *Operations Research*, 5, 269–298.
- [24] Goel, A. ve Gruhn, V. (2008). A General Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 650–660.
- [25] Shetty, V. K., Sudit, M. and Nagi, R. (2008). Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles. *Computers and Operations Research*, 35 (6), 1813–1828.
- [26] Laporte, G. (2009). Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, 43(4), 408–416.
- [27] Bektaş, T. and Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250.
- [28] Derigs, U., Kurowsky, R. and Vogel, U. (2011). Solving a real-world vehicle routing problem with multiple use of tractors and trailers and EU-regulations for drivers arising in air cargo road feeder services. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 309–319.

- [29] Subramanian, A., Uchoa, E. and Ochi, L. S. (2013). A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 40(10), 2519–2531.
- [30] Kirby, D. (1959). Is Your Fleet the Right Size?. *Operational Research Society*, 10(4), 252.
- [31] Gheysens, F., Golden, B. and Assad, A. (1984). A Comparison of Techniques for Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *OR Spektrum*, 6, 207–216.
- [32] Taillard, E. D. (1999). A Heuristic Column Generation Method for the Heterogeneous Fleet Vrp. *RAIRO Rech. Opér.*, 33(1), 1–14.
- [33] Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., Taillard, É. D. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26(12), 1153–1173.
- [34] Renaud, J. and Boctor, F. F. (2002). A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 140, 618–628.
- [35] Golden, B., Raghavan, S. and Wasil, E. (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. (vol. 43). New York. USA: Springer.
- [36] Naji-Azimi, Z. ve Salari, M. (2013). A complementary tool to enhance the effectiveness of existing methods for heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4316–4324.
- [37] Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1–21.
- [38] Dursun, P. (2009). *Zaman Pencereyi Araç Rotalama Probleminin Genetik Algoritma ile Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [39] Kara, I., Koc, O. N., Altıparmak, F., Dengiz, B. (2013). New integer linear programming formulation for the traveling salesman problem with time windows: minimizing tour duration with waiting times. *Optimization*, 62(10), 1309–1319.
- [40] Knight, K. W. and Hofer, J. P. (1968). Vehicle Scheduling with Timed and Connected Calls : A Case Study. *Operational Research Society*, 19(3), 299–310.
- [41] Savelsbergh, M. W. P. (1985). Local search in routing problems with time windows. *Annals of Operations Research*, 4(1), 285–305.

- [42] Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265.
- [43] Savelsbergh, M. W. P. (1992). The Vehicle Routing Problem with Time Windows: Minimizing Route Duration. *Operational Research Society of America*, 4(2), 146–154.
- [44] Desrochers, M., Desrosiers, J. and Solomon, M. (1992). A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research*, 40(2), 342–354.
- [45] Taniguchi, E. and Shimamoto, H. (2004). Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(3–4), 235–250.
- [46] Hsu, C. I., Hung, S. F. and Li, H. C. (2007). Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 465–475.
- [47] Tang, J., Pan, Z., Fung, R. Y. K., Lau, H. (2009). Vehicle routing problem with fuzzy time windows. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(5), 683–695.
- [48] Kritikos, M. N. and Ioannou, G. (2010). The balanced cargo vehicle routing problem with time windows. *International Journal of Production Economics*, 123(1), 42–51.
- [49] Qureshi, A. G., Taniguchi, E. and Yamada, T. (2010). Exact solution for the vehicle routing problem with semi soft time windows and its application. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2( 3), 5931–5943.
- [50] Repoussis, P. P. and Tarantilis, C. D. (2010). Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows via Adaptive Memory Programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 695–712.
- [51] Toth, P. and Vigo, D. (1997). An Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. *Transportation Science*, 31(4), 372–385.
- [52] Toth, P. and Vigo, D. (1999). A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls. 113, 528–543.
- [53] Mingozzi, A., Giorgi, S. and Baldacci, R. (1999). An Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. *Transportation Science*, 33(3), 315–329.

- [54] Dethloff, J. (2002). Relation between vehicle routing problems: an insertion heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up applied to the vehicle routing problem with backhauls. *Journal of the Operational Research Society*, 53(1), 115–118.
- [55] Wade, A. C. and Salhi, S. (2002). An investigation into a new class of vehicle routing problem with backhauls. *Omega*, 30(6), 479–487.
- [56] Crispim, J. and Brandão, J. (2005). Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls. *Journal of the Operational Research Society*, 56(11), 1296–1302.
- [57] Keçeci, B. (2008). *Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi için Tamsayılı Karar Modelleri*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Başkent Üniversitesi.
- [58] Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A: General*, 23(5), 377–386.
- [59] Anily, S. (1996). The vehicle-routing problem with delivery and back-haul options. *Naval Research Logistics*, 43(3), 415–434.
- [60] Mosheiov, G. (1998). Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 34(3), 669–684.
- [61] Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR Spektrum*, 23(1), 79–96.
- [62] Vidović, M., Radivojević, G. and Raković, B. (2011). Vehicle routing in containers pickup up and delivery processes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 335–343.
- [63] Çetin, S. ve 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.
- [64] Atmaca, E. (2012). Bir kargo şirketinde araç rotalama problemi ve uygulaması. *Tübbak Bilim Dergisi*, 5(2), 12–27.
- [65] Schittekat, P., Kinable, J., Sörensen, K., Sevaux, M., Spieksma, F., Springael, J. (2013). A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 518–528.
- [66] Sarasola, B., Doerner, K.F., Schmid, V., Alba, E. (2016). Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 236(2), 425–461.

- [67] Bertsimas, D. J. and Ryzin, G. van. (1991). Stochastic and Dynamic Vehicle Routing in the Euclidean Plane. *Operations Research*, 39(4), 601–615.
- [68] Haghani, A. and Jung, S. (2005). A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times. *Computers & Operations Research*, 32(11), 2959–2986.
- [69] Azadian, F., Murat, A. E. and Chinnam, R. B. (2012). Dynamic routing of time-sensitive air cargo using real-time information. *Transportation Research Part E*, 48(1), 355–372.
- [70] Gendreau, M., Laporte, G. and Seguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88, 3–12.
- [71] Bertsimas, D., Chervi, P. and Peterson, M. (1995). Computational Approaches to Stochastic Vehicle Routing Problems. *Transportation Science*, 29(4), 342–352.
- [72] Dror, M. and Trudeau, P. (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Transportation Science*, 23(2), 141–145.
- [73] Sariklis, D., (1997). *Open Vehicle Routing Problem : Description Formulations and Heuristic Methods*. Doctorate Thesis. London: London University.
- [74] Fu, Z., Eglese, R. and Li, L. Y. O. (2005). A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 56(3), 267–274.
- [75] Schrage, L. (1981). Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 229–232.
- [76] Sariklis, D. and Powell, S. (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51(5), 564–573.
- [77] Salhi, S., Imran, A. and Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers & Operations Research*, 52, 315–325.
- [78] Bettinelli, A., Ceselli, A. and Righini, G. (2011). A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 723–740.
- [79] Laporte, G., Nobert, Y. and Taillefer, S. (1988). Solving a Family of Multi-Depot Vehicle Routing and Location-Routing Problems. *Transportation Science*, 22(3), 161–172.

- [80] Renaud, J., Laporte, G. and Boctor, F. F. (1996). A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 23(3), 229–235.
- [81] Hadjiconstantinou, E. and Baldacci, R. (1998). A Multi-Depot Period Vehicle Routing Problem Arising in the Utilities Sector. *The Journal of the Operational Research Society*, 49(12), 1239–1248.
- [82] Aksoy, Ö. and Kapanoğlu, M. (2012). Multi-Commodity, Multi-Depot, Heterogenous Vehicle Pickup and Delivery Problem for Air Transportation in the Turkish Air Force,” *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 5(4), 53–57.
- [83] Miller, C. E., Tucker, A. W. and Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326–329.
- [84] Alpaslan, M. (2015). *Araç Rotalama Problemleri için Matematiksel Modeller ve Çözüm Yöntemleri*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [85] Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I., Dengiz, B. (2012). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4), 465–477.
- [86] Ekol. <http://www.ekol.com/tr> (Erişim Tarihi: 25.10.2013)
- [87] Çancı, M. ve Erdal, M. (2009). *Uluslararası Taşımacılık Yönetimi*. (3.Baskı). İstanbul, Türkiye: UTİKAD-Uluslararası Taşımacılık ve Lojistik Hizmet Üretenleri Derneği.
- [88] United States Department of Transportation.  
[https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/freight\\_transportation/html/table\\_15.html](https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/freight_transportation/html/table_15.html) (Erişim Tarihi: 25.10.2013)
- [89] Doganis, R. (1991). *Flying Off Course The Economics of International Airlines*. (2nd ed.). New York, USA: Routledge.
- [90] Gökdalay, M. H. (2008). *Havaalanlarının Performans Analizinde Bulanık Çok Ölçütlü Karar Verme Yaklaşımı*. Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [91] THY. <http://www.turkishcargo.com.tr/tr/hizmet-agi-ve-filo/filo> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [92] MNG. <http://www.mngairlines.com/TR/Servisler.aspx> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [93] myCargo. <http://mycargo.aero/tr/cargofleet.php> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)

- [94] ULS. <http://uls-global.aero/tr/default.asp?sayfa=filomuz> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [95] Lufthansa. <https://lufthansa-cargo.com/fleet-ulds/fleet> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [96] Air France. <http://www.airfranceklm.com/en/fleet/cargo> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [97] Fedex. <http://www.fedex.com/us/charters/airplanes.html> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [98] UPS. <https://www.ups.com/aircargo/using/services/services/domestic/svc-aircraft.html> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [99] Qatar Airways. <http://www.qatarairways.com/tr/tr/our-fleet.page> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [100] Swiss World. [https://www.swissworldcargo.com/network\\_fleet/fleet\\_ulds/fleet](https://www.swissworldcargo.com/network_fleet/fleet_ulds/fleet) (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [101] Ethiad. <http://www.etihad.com/en-us/about-us/corporate-profile/our-fleet/> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [102] DHL. <https://aviationcargo.dhl.com/aviationcargo/node/15>(Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [103] Airbus. <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/freighter/a330-200f/specifications/> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [104] Boeing.  
[http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about\\_bca/startup/pdf/freighters/747-400f.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/startup/pdf/freighters/747-400f.pdf) (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [105] Cessna. [http://cessna.txtav.com/en/turboprop/grand-caravan-ex#\\_model-specs](http://cessna.txtav.com/en/turboprop/grand-caravan-ex#_model-specs) (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [106] Cessna Engine.  
[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/research/models/e\\_dms\\_model/media/410-sup\\_rev.pdf](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/e_dms_model/media/410-sup_rev.pdf) (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [107] Nuic, A. (2004). *Aircraft Performance Summary Tables for The Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.6*. Cedex. France: Eurocontrol Experimental Centre.
- [108] EASA. <https://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank#1> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [109] ETC. [http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/pdf/WEB\\_Jet\\_A-Jet\\_A-1.pdf](http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/pdf/WEB_Jet_A-Jet_A-1.pdf) (Erişim Tarihi: 03.04.2016)

- [110] IATA. <http://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/price-analysis.aspx> (Erişim Tarihi: 03.04.2016)
- [111] Cessna Fuel. <http://aeroportos.weebly.com/fuel-prices.html> (Erişim Tarihi: 25.06.2016)
- [112] Rocket Route. <http://www.rocketroute.com/> (Erişim Tarihi: 30.06.2016)
- [113] Google Map. <https://www.google.com/maps/@?dg=dbrw&newdg=1> (Erişim Tarihi: 30.06.2016)
- [114] Balakrishnan, N. (1993). Simple Heuristics for the Vehicle Routeing Problem with Soft Time Windows. *The Journal of the Operational Research Society*, 44(3), 279–287.
- [115] Solomon, M. M. and Desrosiers, J. (1988). The Window Constrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science*, 22(1), 1–13.
- [116] Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y. (1997). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation Science*, 31(2), 170–186.
- [117] Taş, D., Jabali, O. and Woensel, T. Van. (2014). A Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows. *Computers & Operations Research*, 52, 39–54.
- [118] Yan, S., Chu, J. C., Hsiao, F.-Y., Huang, H.-J. (2015). A planning model and solution algorithm for multi-trip split-delivery vehicle routing and scheduling problems with time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 383–393.
- [119] Zare-Reisabadi, E. and Hamid Mirmohammadi, S. (2015). Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. *Computers & Industrial Engineering*, 90, 177–185.

## EK-1. Matematiksel Model 1 GAMS Kodu

\$Title Çok Depolu Heterojen Filolu Zaman Pencereci Araç-Rotalama Problemi

\$label datGAMS

\$include ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_deg.inc

variables

f;

binary variables

z(k,j)

x(i,j,t,v);

positive variables

u(i)

w(i,t,v);

equations

amac

kisit1

kisit2

kisit3

kisit4

kisit5

kisit6

kisit7

kisit8

kisit9

kisit10

kisit11

kisit12

kisit13

kisit14

kisit15

kisit16

kisit17;

amac..f=e=sum((k,j,t,v)\$ (ord(k)<3 and 2<ord(j) and ord(v)<=A(t)),Fe(t,v)\*x(k,j,t,v))+sum((i,j,t,v)\$ ((ord(i) ne ord(j))  
and 4<ord(t) and ord(v)<=A(t)),LT(t,v)\*x(i,j,t,v))+sum((k,t,v)\$ (ord(k)<3 and 4<ord(t) and  
ord(v)<=A(t)),beta(k,t)\*s(k,t,v))+sum((i,j,t,v)\$ (ord(v)<=A(t)),alfa(t)\*c(i,j,t)\*x(i,j,t,v));

kisit1(j)\$ (2<ord(j))..sum(k\$(ord(k)<3),z(k,j))=e=1;

kisit2(j)\$ (2<ord(j))..sum((i,t,v)\$ ((ord(i) ne ord(j)) and ord(v)<=A(t)),x(i,j,t,v))=e=1;

kisit3(t,v)\$ (ord(v)<=A(t))..sum((k,j)\$ (ord(k)<3 and 2<ord(j)),x(k,j,t,v))=l=1;

kisit6(j,t,v)\$ (ord(v)<=A(t))..sum(i,x(i,j,t,v))-sum(i,x(j,i,t,v))=e=0;

kisit7(k,j)\$ (ord(k)<3 and 2<ord(j))..sum((t,v)\$ (ord(v)<=A(t)),x(k,j,t,v))=l=z(k,j);

kisit8(k,j)\$ (ord(k)<3 and 2<ord(j))..sum((t,v)\$ (ord(v)<=A(t)),x(j,k,t,v))=l=z(k,j);

kisit10(t,v)\$ (ord(v)<=A(t))..sum((i,j)\$ (2<ord(j)),d(j)\*x(i,j,t,v))=l=Q(t);

kisit11(i,j,t,v)\$ (4<ord(t) and ord(v)<=A(t))..c(i,j,t)\*x(i,j,t,v)=l=R(t,v);

```
kisit15(i,t,v)$ (ord(v) <= A(t))..aa(i)*sum(j$(2 < ord(j) and (ord(i) ne ord(j))),x(i,j,t,v))=l=w(i,t,v);
kisit16(i,t,v)$ (ord(v) <= A(t))..w(i,t,v)=l=b(i)*sum(j$(ord(i) ne ord(j)),x(j,i,t,v));
kisit17(i,j)$ (2 < ord(i) and 2 < ord(j) and (ord(i) ne ord(j)))..u(i)-u(j)+n*sum((t,v)$ (ord(v) <= A(t)),x(i,j,t,v))=l=n-1;
```

```
Model ekol_time_24_ort_kar3_deg/ all / ;
```

```
option limrow=10000;
```

```
option limcol=100;
```

```
ekol_time_24_ort_kar3_deg.optcr=0;
```

```
Solve ekol_time_24_ort_kar3_deg using mip minimizing f;
```

```
Display f,l,x,l,z,l,w,l,s,l,u,l,n;
```

```
Display ekol_time_24_ort_kar3_deg.modelstat,ekol_time_24_ort_kar3_deg.solvestat;
```

**Not:** Firmaların gizlilik politikasından dolayı matematiksel model 1'e ait GAMS kodunun tamamı ve veriler verilmemiştir.

## EK-2. Matematiksel Model 2 GAMS Kodu

```
$Title Çok Depolu Heterojen Filolu Zaman Pencereli Araç-Rotalama Problemi (Belirsiz depo)
$label datGAMS
$include ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg.inc
variables
f;
binary variables
z(k,j)
y(k)
x(i,j,t,v);
positive variables
u(i)
w(i,t,v);

equations
amac
kisit1
kisit2
kisit3
kisit4
kisit5
kisit6
kisit7
kisit8
kisit9
kisit10
kisit11
kisit12
kisit13
kisit14
kisit15
kisit16
kisit17
kisit18
kisit19;

amac..f=e+sum((k,j,t,v)$((ord(k)<5 and 4<ord(j) and ord(v)<=A(t)),Fe(t,v)*x(k,j,t,v))+sum((i,j,t,v)$((ord(i) ne ord(j))
and 4<ord(t) and ord(v)<=A(t)),LT(t,v)*x(i,j,t,v))+sum((k,t,v)$((ord(k)<5 and 4<ord(t) and
ord(v)<=A(t)),beta(k,t)*s(k,t,v))+sum((k)$((ord(k)<5),De(k)*y(k))+sum((i,j,t,v)$((
ord(v)<=A(t)),alfa(t)*c(i,j,t)*x(i,j,t,v)));
kisit1(j)$((4<ord(j))..sum(k$(ord(k)<5),z(k,j))=e=1;
kisit3(j)$((4<ord(j))..sum((i,t,v)$((ord(i) ne ord(j)) and ord(v)<=A(t)),x(i,j,t,v))=e=1;
kisit4(t,v)$((ord(v)<=A(t))..sum((k,j)$((ord(k)<5 and 4<ord(j)),x(k,j,t,v))=1=1;
kisit7(j,t,v)$((ord(v)<=A(t))..sum(i,x(i,j,t,v))-sum(i,x(j,i,t,v))=e=0;
```

```

kisit8(k,j)$ord(k)<5 and 4<ord(j)..sum((t,v)$ord(v)<=A(t),x(k,j,t,v))=l=z(k,j);
kisit9(k,j)$ord(k)<5 and 4<ord(j)..sum((t,v)$ord(v)<=A(t),x(j,k,t,v))=l=z(k,j);
kisit11(t,v)$ord(v)<=A(t)..sum((i,j)$4<ord(j)),d(j)*x(i,j,t,v))=l=Q(t);
kisit12(k)$ord(k)<5)..sum(j$4<ord(j),d(j)*z(k,j))=l=ve(k);
kisit13(i,j,t,v)$4<ord(t) and ord(v)<=A(t)..c(i,j,t)*x(i,j,t,v)=l=R(t,v);
kisit17(i,t,v)$ord(v)<=A(t)..aa(i)*sum(j$4<ord(j) and (ord(i) ne ord(j))),x(i,j,t,v))=l=w(i,t,v);
kisit18(i,t,v)$ord(v)<=A(t)..w(i,t,v)=l=b(i)*sum(j$((ord(i) ne ord(j))),x(j,i,t,v));
kisit19(i,j)$4<ord(i) and 4<ord(j) and (ord(i) ne ord(j))..u(i)-u(j)+n*sum((t,v)$ord(v)<=A(t),x(i,j,t,v))=l=n-1;

```

```
Model ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg / all / ;
```

```

option limrow=10000;
option limcol=100;
ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg.optcr=0;

```

```
Solve ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg using mip minimizing f;
```

```
Display f,l,x,l,y,l,z,l,w,l,s,l,u,l,n;
```

```
Display ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg.modelstat,ekol_time_24_ort_kar3_lrp_deg.solvestat;
```

**Not:** Firmaların gizlilik politikasından dolayı matematiksel model 2'ye ait GAMS kodunun tamamı ve veriler verilmemiştir.

### EK-3. Matematiksel Model 1 Senaryo 1 İstatistikler

#### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	18	SINGLE EQUATIONS	60,367
BLOCKS OF VARIABLES	6	SINGLE VARIABLES	42,212
NON ZERO ELEMENTS	607,649	DISCRETE VARIABLES	40,368

GENERATION TIME = 1.547 SECONDS 31 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
EXECUTION TIME = 1.547 SECONDS 31 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows 02/01/17 00:37:16 Page 6  
Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi  
Solution Report SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_deg Using MIP From line 1424

#### SOLVE SUMMARY

MODEL ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_deg OBJECTIVE f  
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER CPLEX FROM LINE 1424

\*\*\*\* SOLVER STATUS 3 Resource Interrupt  
\*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 2145.4000

RESOURCE USAGE, LIMIT 5000.249 5000.000  
ITERATION COUNT, LIMIT 3835612 2000000000  
IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows  
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34  
GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.  
MIP status(107): time limit exceeded  
Fixed MIP status(1): optimal  
Resource limit exceeded.

MIP Solution: 2145.400000 (3835596 iterations, 29507 nodes)  
Final Solve: 2145.400000 (16 iterations)  
Best possible: 1773.179963  
Absolute gap: 372.220037  
Relative gap: 0.173497

## EK-4. Matematiksel Model 1 Senaryo 2 İstatistikler

### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	18	SINGLE EQUATIONS	60,367
BLOCKS OF VARIABLES	6	SINGLE VARIABLES	42,212
NON ZERO ELEMENTS	607,649	DISCRETE VARIABLES	40,368

GENERATION TIME = 1.844 SECONDS 31 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
EXECUTION TIME = 1.844 SECONDS 31 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows 02/01/17 22:40:54 Page 6  
Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi  
Solution Report SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_deg1 Using MIP From line 1424

### SOLVE SUMMARY

MODEL ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_deg1 OBJECTIVE f  
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER CPLEX FROM LINE 1424

\*\*\*\* SOLVER STATUS 3 Resource Interrupt  
\*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 23458.5413

RESOURCE USAGE, LIMIT 9000.307 9000.000  
ITERATION COUNT, LIMIT 7693769 2000000000

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows  
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34  
GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.  
MIP status(107): time limit exceeded  
Fixed MIP status(1): optimal  
Resource limit exceeded.

MIP Solution: 23458.541291 (7693752 iterations, 34470 nodes)  
Final Solve: 23458.541291 (17 iterations)  
Best possible: 22261.404606  
Absolute gap: 1197.136685  
Relative gap: 0.051032

## EK-5. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 İstatistikler - 1

(Not: Bu senaryoda depo açma maliyeti \$10000 olarak alınmıştır.)

### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	20	SINGLE EQUATIONS	57,631
BLOCKS OF VARIABLES	7	SINGLE VARIABLES	42,264
NON ZERO ELEMENTS	714,789	DISCRETE VARIABLES	40,420

GENERATION TIME = 1.375 SECONDS 28 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010

EXECUTION TIME = 1.375 SECONDS 28 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010

GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows 12/15/16 15:54:01 Page 6

Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi

Solution Report SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_lrp1\_kar Using MIP From line 1445

### SOLVE SUMMARY

MODEL ekol\_time\_24\_ort\_lrp1\_kar OBJECTIVE z

TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE

SOLVER CPLEX FROM LINE 1445

\*\*\*\* SOLVER STATUS 3 Resource Interrupt

\*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution

\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 22239.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT 5000.278 5000.000

ITERATION COUNT, LIMIT 1713980 2000000000

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows

Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34

GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.

Reading parameter(s) from "C:\Users\User\Documents\gamsdir\projdir\cplex.opt"

>> mipemphasis 4

Finished reading from "C:\Users\User\Documents\gamsdir\projdir\cplex.opt"

Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.

MIP status(107): time limit exceeded

Fixed MIP status(1): optimal

Resource limit exceeded.

MIP Solution: 22239.000000 (1713967 iterations, 18137 nodes)

Final Solve: 22239.000000 (13 iterations)

Best possible: 11370.882128

Absolute gap: 10868.117872

Relative gap: 0.488696

## EK-6. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 İstatistikler – 2

(Not: Bu senaryoda depo açma maliyeti \$10000 olarak alınmıştır.)

### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	20	SINGLE EQUATIONS	57,631
BLOCKS OF VARIABLES	7	SINGLE VARIABLES	42,264
NON ZERO ELEMENTS	714,789	DISCRETE VARIABLES	40,420

GENERATION TIME = 1.281 SECONDS 28 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
EXECUTION TIME = 1.281 SECONDS 28 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010  
GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows 12/13/16 11:58:39 Page 6  
Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi  
Solution Report SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_lrp1 Using MIP From line 1441

### SOLVE SUMMARY

MODEL ekol\_time\_24\_ort\_lrp1 OBJECTIVE z  
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER CPLEX FROM LINE 1441

\*\*\*\* SOLVER STATUS 3 Resource Interrupt  
\*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 28713.2506

RESOURCE USAGE, LIMIT 3000.259 3000.000  
ITERATION COUNT, LIMIT 4123873 2000000000

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows  
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34  
GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.  
MIP status(107): time limit exceeded  
Fixed MIP status(1): optimal  
Resource limit exceeded.

MIP Solution: 28713.250625 (4123860 iterations, 22046 nodes)  
Final Solve: 28713.250625 (13 iterations)  
Best possible: 14269.604923  
Absolute gap: 14443.645702  
Relative gap: 0.503031

## EK-7. Matematiksel Model 2 Senaryo 1 İstatistikler – 3

(Not: Bu senaryoda depo açma maliyeti \$50000 olarak alınmıştır.)

### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      20      SINGLE EQUATIONS      57,631  
BLOCKS OF VARIABLES      7      SINGLE VARIABLES      42,264  
NON ZERO ELEMENTS      714,789      DISCRETE VARIABLES      40,420  
GENERATION TIME      =      2.094 SECONDS      33 Mb      WIN235-235 Jul 2, 2010  
EXECUTION TIME      =      2.094 SECONDS      33 Mb      WIN235-235 Jul 2, 2010  
GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows      04/15/17 19:55:19 Page 6  
Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi  
Solution Report      SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_lrp\_deg\_1 Using MIP From line 1438

### SOLVE SUMMARY

MODEL      ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_lrp\_deg\_1      OBJECTIVE      f  
TYPE      MIP      DIRECTION      MINIMIZE  
SOLVER      CPLEX      FROM LINE      1438

\*\*\*\* SOLVER STATUS      3 Resource Interrupt  
\*\*\*\* MODEL STATUS      8 Integer Solution  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE      102355.2000

RESOURCE USAGE, LIMIT      2500.309      2500.000  
ITERATION COUNT, LIMIT      2986022      2000000000

IBM ILOG CPLEX      Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows  
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34  
GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.  
MIP status(107): time limit exceeded  
Fixed MIP status(1): optimal  
Resource limit exceeded.

MIP Solution:      102355.200000      (2986010 iterations, 15601 nodes)  
Final Solve:      102355.200000      (12 iterations)  
Best possible:      51551.287466  
Absolute gap:      50803.912534  
Relative gap:      0.496349

## EK-8. Matematiksel Model 2 Senaryo 2 İstatistikler – 4

(Not: Bu senaryoda depo açma maliyeti \$50000 olarak alınmıştır.)

### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	20	SINGLE EQUATIONS	57,631
BLOCKS OF VARIABLES	7	SINGLE VARIABLES	42,264
NON ZERO ELEMENTS	714,789	DISCRETE VARIABLES	40,420
GENERATION TIME	=	1.844 SECONDS	33 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010
EXECUTION TIME	=	1.844 SECONDS	33 Mb WIN235-235 Jul 2, 2010
GAMS Rev 235 WEX-VS8 23.5.1 x86/MS Windows 04/15/17 23:02:52 Page 6			

Ekol Lojistik Araç-Rotalama Problemi

Solution Report SOLVE ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_lrp\_deg\_2 Using MIP From line 1438

### SOLVE SUMMARY

MODEL ekol\_time\_24\_ort\_kar3\_lrp\_deg\_2 OBJECTIVE f  
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER CPLEX FROM LINE 1438

\*\*\*\* SOLVER STATUS 3 Resource Interrupt

\*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution

\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 105660.6000

RESOURCE USAGE, LIMIT 3000.286 3000.000

ITERATION COUNT, LIMIT 3185769 2000000000

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows

Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34

GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.

Cplex MIP uses 1 of 8 parallel threads. Change default with option THREADS.

MIP status(107): time limit exceeded

Fixed MIP status(1): optimal

Resource limit exceeded.

MIP Solution: 105660.600000 (3185757 iterations, 14395 nodes)

Final Solve: 105660.600000 (12 iterations)

Best possible: 54403.370487

Absolute gap: 51257.229513

Relative gap: 0.485112