

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN
BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET İKBAL KAYA

DENİZLİ, KASIM - 2019

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN
BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET İKBAL KAYA

DENİZLİ, KASIM - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Muhammet İkbâl KAYA tarafından hazırlanan “İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.11.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

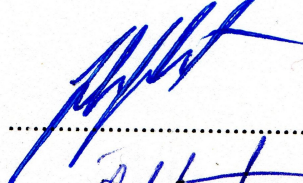
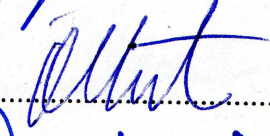
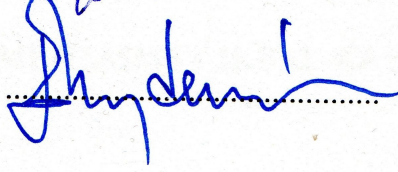
Doç. Dr. Olcay POLAT

Üye

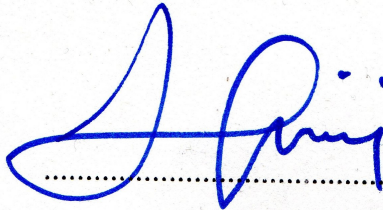
Doç. Dr. Özcan MUTLU

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Erdal AYDEMİR


.....

.....

.....
.....
.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
04.12.2019 tarih ve ...48.1.10... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


.....

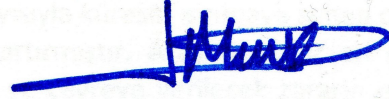
Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

OZET

İKİ EŞYALI KENÇİ ARACI ROTALAMA PROBLEMİ ÜZERİNDE MATEMATİKSEL MODEL OLUŞTURULMASI

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



MUHAMMET İKBAL KAYA

ANABİTAR KİLİMELEER: İki eşyali araç rotalama problemi, Kençel
bilgi, Matematiksel modelleme

ÖZET

İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET İKBAL KAYA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. OLCAY POLAT)

DENİZLİ, KASIM - 2019

Son yıllarda taşımacılık maliyetlerinin firmaların maliyet kalemlerinin büyük bir bölümünü oluşturmaya başlaması, artan nüfusun etkisiyle kamu taşımacılığının önemli bir mesele haline gelmesi, taşımacılık sırasında dizel araçlar tarafından havaya salınan fazla miktardaki CO₂ sonucu çevre kirliliğine ve dolayısıyla küresel ısınmaya sebep olması gibi sorunlar lojistik alanına olan ilgiyi bir hayli artırmıştır. Araştırmacılar en düşük maliyet, en düşük mesafe, en yüksek sosyal fayda ve çevreye verilecek zararın en aza indirilmesi gibi amaçlar doğrultusunda çalışmalar yürütmektedirler. Küresel ısınmanın ciddi bir sorun haline geldiği günümüzde çoğu Avrupa ülkeleri başta olmak üzere bazı ülkelerde hava kirliliğine ve gürültü kirliliğine neden olduğu için dizel araçların şehir merkezine girmesi yasaklanmıştır. Bu durum kentsel lojistik alanında çalışan araştırmacıları ve firmaları çok aşamalı araç rotalama sistemleri üzerine çalışmaya itmiştir. Çok aşamalı araç rotalama sistemleri en az iki aşamadan oluşmakla birlikte bunlardan iki aşamalı sistemde müşterilere hizmet verilirken ana depolardan şehir merkezinin dışında fakat şehir merkezine sınır yerlere konumlanan uydu depolara ürünler dizel araçlar ile taşınmakta olup, ürünler uydu depodan müşterilere dizel harici daha küçük araçlarla ulaştırılmaktadır. Bu tez kapsamında ele alınan çalışma bir iki aşamalı araç rotalama problemi olmakla birlikte bu çalışmada müşterilerin sadece belirli zaman aralıklarında ziyaret edilebildiği zaman penceresi, müşterilerin dağıtım taleplerinin yanısıra toplama taleplerinin de olduğu eş zamanlı topla dağıt, birden fazla ürünün hizmetinin verildiği çok ürünlü ve birden fazla ana deponun mevcut olduğu çok depolu sistemleri içinde barındıran bir matematiksel model önerilmektedir. Önerilen matematiksel model ile örnek olarak oluşturulan 120 küçük çaplı problem başarı ile çözülmüştür. Sonuçlar göstermiştir ki, bu tez kapsamındaki problemlerin bütünleşik olarak ele alınması problemin sahadaki gerçek karar vericilerine fayda sağlayabilecektir.

ANAHTAR KELİMELELER: İki aşamalı araç rotalama problemi, Kentsel lojistik, Matematiksel modelleme

ABSTRACT

A MATHEMATICAL MODEL FOR TWO-ECHELON RICH VEHICLE ROUTING PROBLEM

MSC THESIS

MUHAMMET İKBAL KAYA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. OLCAY POLAT)

DENİZLİ, NOVEMBER 2019

In recent years, transportation costs have started to constitute the biggest part of the firms's cost items. Public transportation has become an important issue with the effect of increasing population and environmental pollution caused by excessive amount of CO₂ emitted by diesel vehicles during transportation and thus have caused global warming. This situation has highly increased researchers's interests in logistic systems. Researchers have been conducting studies on logistic systems with the motivations of reducing logistic costs, increasing the social welfare and decreasing the damage to environment caused by diesel vehicles. In today's world, where global warming has become a serious problem, diesel vehicles in some cities of Europe are forbidden to enter the city center as they cause air pollution and noise pollution. This has led firms and researchers who study on city logistics to study on multi-echelon vehicle routing systems. Multi-echelon vehicle routing systems consist of at least two echelon systems. In two-echelon vehicle routing systems, the products are carried from depots to the satellites located in the borders of the city center and then delivered to the customers from the satellites by non-diesel smaller vehicles. The study conducted in this thesis is two-echelon vehicle routing problem. Moreover, it considers a bunch of vehicle routing problem variants such as time windows where customers are allowed to be visited at certain time intervals, simultaneous pickup and delivery where customers have pickup demands as well as delivery demands, multi-product where several products are served to the customers and multi-depot where a network consists of more than one depot. A mathematical model has been proposed considering vehicle routing problem variants mentioned above. The proposed mathematical model has been successful on solving 120 small-sized problem variants. The results of the problem conducted in this study show that dealing with various number of vehicle routing problem variants as in one, the proposed mathematical model will be useful for decision makers in the field.

KEYWORDS: Two-echelon vehicle routing problem, City logistics, Mathematical model

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ.....	5
2.1 Gezin Satıcı Problemi.....	5
2.2 Araç Rotalama Problemi	8
2.3 Araç Rotalama Problemi Türleri	11
2.4 Kentsel Lojistikte ARP Uygulamaları.....	15
2.4.1 Zaman Pencere Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP	16
2.4.2 Çok Depolu ARP	20
2.4.3 İki Aşamalı ARP.....	23
2.4.4 Çok Ürünlü ARP.....	27
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	31
4. İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ	43
4.1 Problemin Tanımı.....	43
4.2 Matematiksel Model.....	44
5. UYGULAMALAR.....	50
5.1 Vaka Çalışmaları	50
5.1.1 Vaka 1	50
5.1.2 Vaka 2	54
5.1.3 Vaka 3	57
5.2 Test Problemleri	60
5.3 Duyarlılık Analizi.....	65
5.3.1 Birinci Aşamadaki Araç Sayısı ve Araç Kapasitesi Değişimi Etkisi	65
5.3.2 İkinci Aşamadaki Araç Sayısı ve Araç Kapasitesi Değişimi Etkisi	66
5.3.3 Ana Depo Sayısındaki Değişim Etkisi.....	68
5.3.4 Uydu Depo Sayısındaki Değişim Etkisi	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
7. KAYNAKLAR.....	72
8. EKLER.....	80
EK A. Veri Setleri	80
9. ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Lojistik ağı (Çetinkaya ve diğ. 2017)	2
Şekil 2.1: Gezgin satıcı problemine genel bakış (Schirber 2017).....	5
Şekil 2.2: NP-karmaşıklık sınıfı.....	7
Şekil 2.3: Araç rotalama problemine genel bakış (Dhawan ve diğ. 2014)	9
Şekil 2.4: Araç rotalama problem türleri (Atasagun 2015).....	11
Şekil 2.5: ZP_EZTD_ARP'nin genel görünümü.....	17
Şekil 2.6: ÇD_ARP'nin genel görünümü	21
Şekil 2.7: 2A_ARP'nin genel görünümü.....	24
Şekil 2.8: ÇÜ_ARP'nin genel görünümü	28
Şekil 4.1: 2A_Z_ARP'nin genel görünümü	44
Şekil 5.1: Vaka 1 çözümü ağ gösterimi	52
Şekil 5.2: Vaka 2 çözümü ağ gösterimi	55
Şekil 5.3: Vaka 3 çözümü ağ gösterimi	58

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Taşıma yöntemleri ve özelliklerinin kıyaslanması (Salcan 2012).....	3
Tablo 3.1: Literatürde 2A_ ARP üzerine dair yapılmış çalışmalar.....	41
Tablo 5.1: Vaka 1 araç verileri.....	51
Tablo 5.2: Vaka 1 uydu depo kapasite verileri	51
Tablo 5.3: Vaka 1 birinci aşamadaki rota oluşumu.....	52
Tablo 5.4: Vaka 1 uydu depoların ürün talepleri	52
Tablo 5.5: Vaka 1 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler	53
Tablo 5.6: Vaka 1 ikinci aşamadaki rota oluşumu	53
Tablo 5.7: Vaka 1 ağda yer alan düğümlerin ziyaret zamanı.....	53
Tablo 5.8: Vaka 2 araç verileri.....	54
Tablo 5.9: Vaka 2 uydu depo kapasite verileri	54
Tablo 5.10: Vaka 2 birinci aşamadaki rota oluşumu.....	55
Tablo 5.11: Vaka 2 uydu depoların ürün talepleri	55
Tablo 5.12: Vaka 2 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler	56
Tablo 5.13: Vaka 2 ikinci aşamadaki rota oluşumu	56
Tablo 5.14: Vaka 2 ağda yer alan düğümlerin ziyaret zamanı.....	56
Tablo 5.15: Vaka 3 araç verileri.....	57
Tablo 5.16: Vaka 3 uydu depo kapasite verileri	57
Tablo 5.17: Vaka 3 birinci aşamadaki rota oluşumu.....	58
Tablo 5.18: Vaka 2 uydu depoların ürün talepleri	58
Tablo 5.19: Vaka 3 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler	59
Tablo 5.20: Vaka 3 ikinci aşamadaki rota oluşumu	59
Tablo 5.21: Vaka 3 ağda yer alan düğümlerin ziyaret zamanı.....	59
Tablo 5.22: Üç vakaya ait sonuçlar.....	60
Tablo 5.23: 2 ürünlü 15 müşterili alt problem seti.....	60
Tablo 5.24: 2 ürünlü 20 müşterili alt problem seti.....	61
Tablo 5.25: 2 ürünlü 25 müşterili alt problem seti.....	62
Tablo 5.26: 2 ürünlü 30 müşterili alt problem seti.....	62
Tablo 5.27: 3 ürünlü 15 müşterili alt problem seti.....	63
Tablo 5.28: 3 ürünlü 20 müşterili alt problem seti.....	64
Tablo 5.29: 3 ürünlü 25 müşterili alt problem seti.....	64
Tablo 5.30: 3 ürünlü 30 müşterili alt problem seti.....	65
Tablo 5.31: Birinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi değişiminin etkisi..	66
Tablo 5.32: İkinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi değişiminin etkisi...	67
Tablo 5.33: Ana depo sayısındaki değişimin etkisi	68
Tablo 5.34: Uydu depo sayısındaki değişimin etkisi	69
Tablo A.1: Ağdaki düğümlere ait veriler	80
Tablo A.2: Ağdaki ürünlere Ait Veriler	81
Tablo A.3: Ağdaki müşterilere Ait Talepler	82

SEMBOL LİSTESİ

1A_ARP	:	Bir Aşamalı Araç Rotalama Problemi
2A_ARP	:	İki Aşamalı Araç Rotalama Problemi
2A_Z_ARP	:	İki Aşamalı Zengin Araç Rotalama Problemi
2A_KPK_ARP	:	İki Aşamalı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi
2A_ZB_ARP	:	İki Aşamalı Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi
AA	:	Ayrıştırma Algoritması
ARP	:	Araç Rotalama Problemi
ASM_ARP	:	Asimetrik Araç Rotalama Problemi
AU_ARP	:	Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi
BT_ARP	:	Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi
BT_ÇÜ_ARP	:	Bölünebilir Talepli Çok Ürünlü Araç Rotalama Problemi
ÇA_ARP	:	Çok Aşamalı Araç Rotalama Problemi
ÇD_ARP	:	Çok Depolu Araç Rotalama Problemi
ÇDKA	:	Çok Değişkenli Komşuluk Araması
ÇD_P_ARP	:	Çok Depolu Periyodik Araç Rotalama Problemi
ÇT_ARP	:	Çok Turlu Araç Rotalama Problemi
ÇÜ_ARP	:	Çok Ürünlü Araç Rotalama Problemi
D_ARP	:	Dinamik Araç Rotalama Problemi
DEA	:	Diferansiyel Evrim Algoritması
DFKA	:	Dal Fiyat Kesme Algoritması
DKA	:	Değişken Komşuluk Arama
EYKA	:	En Yakın Komşuluk Algoritması
EZTD_ARP	:	Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
GA	:	Genetik Algoritma
GSP	:	Gezgin Satıcı Problemi
HMAF_ARP	:	Homojen Araç Filolu Araç Rotalama Problemi
HTAF_ARP	:	Heterojen Araç Filolu Araç Rotalama Problemi
K_ARP	:	Klasik Araç Rotalama Problemi
KPK_ARP	:	Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi
KU_ARP	:	Kapalı Uçlu Araç Rotalama Problemi
MK_ARP	:	Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi
MSA	:	Modüler Sezgisel Algoritma
ÖDST_ARP	:	Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi
P_ARP	:	Periyodik Araç Rotalama Problemi
PTB	:	Paralel Tavlama Benzetimi
S_ARP	:	Stokastik Araç Rotalama Problemi
SM_ARP	:	Simetrik Araç Rotalama Problemi
ST_ARP	:	Statik Araç Rotalama Problemi
TB	:	Tavlama Benzetimi
TD_ARP	:	Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
TÜ_ARP	:	Tek Ürünlü Araç Rotalama Problemi
UBKA	:	Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Araması
YA	:	Yasaklı Arama
YM_ÇD_ARP	:	Yükleme Maliyetli Çok Depolu Araç Rotalama Problemi
YYA	:	Yinelemeli Yerel Arama

ZB_ARP : Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi
ZP_ARP : Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi



ÖNSÖZ

Bu tez sürecinde iyi niyeti, engin bilgisi ve yüksek çalışma motivasyonu ile destek olan değerli hocam Doç. Dr. Olcay Polat'a ve bu zorlu süreçte daima yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet İkbâl KAYA



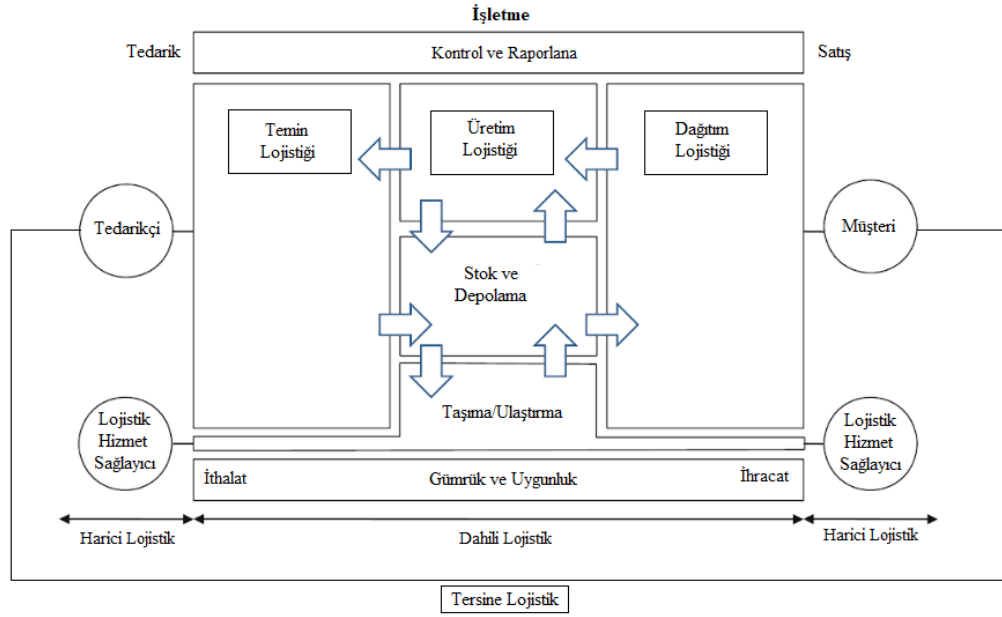
1. GİRİŞ

Müşteri ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla mal veya hizmet sektöründe işlem gören ürünlerin ve bu mal ve ürünlere dair bilgi akışının bir noktadan başka bir noktaya taşınmasına lojistik denilmektedir (Çetinkaya ve diğ. 2017).

Günümüzde küreselleşmenin etkisiyle birlikte müşterilerin yapmış olduğu alışverişten beklentileri artmıştır. Müşteriler, satın almak istediği ürünü farklı üreticilerden ve/veya farklı perakende mağazalarından daha uygun fiyata tedarik edebilmektedir. Bu durum satış yapan firmalar arasında rekabet ortamının doğmasına sebep olmaktadır. Maliyetlerini en iyi şekilde yönetebilen firmalar müşterilerine en uygun fiyatları verebilmektedir. Bir malın veya hizmet sektöründe işlem gören ürünlerin maliyetleri düşünüldüğünde lojistik maliyeti bunların başında gelmektedir.

Yük taşımacılığı sektörü, ülkedeki istihdam ve ülkenin ekonomik gelişimi açısından önemli bir alandır. Günümüzde lojistik faaliyetleri bir firmanın maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu yüzden bu alanda yapılan çalışmalar ve iyileştirmeler büyük önem arz etmektedir. Lojistik faaliyetlere dair çok sayıda akademik çalışma mevcuttur.

Çetinkaya ve diğ. (2017), işletmelerin lojistik faaliyetleri dört ana başlık altında ele aldığını belirtmiştir. Bunlar; temin lojistiği, üretim lojistiği, dağıtım lojistiği ve geri dönüşüm lojistiği diğer ismiyle tersine lojistikdir. Temin lojistiği, bir firmanın üretimini gerçekleştirebilmesi için gereken hammaddenin, yarı mamulün veya işletmeye giren herhangi bir ürünün akışının sağlanmasıdır. Üretim lojistiği, üretim sürecindeki taşıma faaliyetlerini ve üretim süreci sonunda elde edilen nihai ürünün depolanmasını veya dağıtım merkezlerine taşınmasını ifade etmektedir. Dağıtım lojistiği, üretimi tamamlanan nihai ürünlerin depolardan veya dağıtım merkezlerinden müşterilere ve pazara ulaştırılmasıdır. Geri dönüş lojistiği (tersine lojistik), müşterilerin belli bir süre kullandığı ve artık kullanılmaz hale gelen nihai ürünlerin toplanıp hammaddelerine ayrıştırılarak tekrardan üretim sürecinde kullanılması için üretim merkezlerine taşınmasıdır.



Şekil 1.1: Lojistik ağı (Çetinkaya ve diğ. 2017)

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte taşımacılık sektörü de müşteri ihtiyaçları doğrultusunda oldukça gelişmiştir. Gelişen bu ortamda müşteriler ürünlerinin taşınmasında kaliteli ve güvenilir bir hizmet almak istemektedirler. Ürün türüne ve müşteri ihtiyacına göre değişmekle birlikte müşteriler bazı durumlarda ürünlerin kendilerine ulaşmasında daha sabırlı olabiliyorken, diğer durumlarda ise kısa sürede ürünlerin ellerine ulaşmasını istemektedirler. Diğer yandan üretici firmalar, taşımacılık maliyetlerini düşürmek ve ürünleri müşterilerine ulaştırırken kaliteli ve güvenilir bir hizmet sağlamak arasındaki dengeyi sağlayabilmek adına çalışmalar yapmaktadırlar.

Taşımacılıkta; yaygın olarak denizyolu taşımacılığı, demiryolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığı ve hava yolu taşımacılığı kullanılmaktadır. Denizyolu taşımacılığı en yavaş taşımacılık türü olmakla birlikte çok yüksek miktarda ürünün taşınabilmesine imkân sağladığı için en düşük birim taşıma maliyetine sahip taşıma türüdür. Denizyolu taşımacılığında maliyetin düşük olmasının bir diğer sebebi de uluslararası taşımacılıkta sınır geçiş prosedürlerine maruz kalmamasıdır. Demiryolu taşımacılığı, denizyolu taşımacılığına kıyasla daha maliyetli fakat nispeten daha hızlı bir taşıma türüdür. Demiryolu taşımacılığı, kırılabilir hassas ürünlerin taşınmasında tercih edilmemektedir. Karayolu taşımacılığı, uluslararası taşımacılıkta sınır geçiş prosedürlerinden dolayı ve taşınabilen yük miktarı denizyolu ve demiryolu taşımacılığına kıyasla daha sınırlı olduğu için taşımacılık maliyeti en yüksek ikinci

taşıma türüdür. Havayolu taşımacılığı, ürünlerin en hızlı taşındığı en yüksek maliyetli taşıma türüdür. Havayolu taşımacılığı genellikle boyut olarak küçük olan ve hızlı bir şekilde ulaştırılması gereken ürünlerin taşınmasında tercih edilmektedir (Görçün 2016).

Tablo 1.1: Taşıma yöntemleri ve özelliklerinin kıyaslanması (Salcan 2012)

Taşıma Türü	Maliyet	Hız	Hizmet Alanı	Tarifeli Seferlerin Sıklığı	Tarifelerin Uygulanma Güvenilirliği
Karayolu	Yüksek	Hızlı	Çok Geniş	Yüksek	Yüksek
Denizyolu	Çok Düşük	Yavaş	Sınırlı	Çok Düşük	Orta
Havayolu	Çok Yüksek	Çok Hızlı	Geniş	Yüksek	Yüksek
Demiryolu	Orta	Orta	Orta	Düşük	Çok Yüksek
İç su yolu	Düşük	Yavaş	Sınırlı	Düşük	Orta
Boru Hattı	Düşük	Yavaş	Çok Sınırlı	Orta	Yüksek

Müşterilere firmalar tarafından kaliteli taşımacılık hizmetinin verilmesinde taşımacılık türlerinin seçiminin etkili olduğu kadar dağıtım lojistik sisteminin en uygun şekilde tasarlanması da büyük önem arz etmektedir. Bahsedilen dört lojistik türünden dağıtım lojistiğinde, üretimi tamamlanmış ürünlerin müşteriye ulaştırılması söz konusudur. Bu akış müşterilere dağıtım merkezi ve perakende mağazaları aracılığıyla sağlanabileceği gibi üretim merkezinden müşterilere doğrudan bir akış da söz konusu olabilmektedir. Firmaların lojistik maliyetlerini düşürmesi, dağıtım lojistik ağını en iyi şekilde tasarlamasıyla ve firma bünyesinde hizmet veren araçlar başta olmak üzere bütün kaynaklarını en uygun şekilde kullanmasıyla mümkün olmaktadır. Ağ tasarımının yapılmasında depo sayısı, araç sayısı, müşteri sayısı, müşterinin depo veya depolara uzaklığı gibi birçok parametre firmaların lojistik maliyetlerini doğrudan etkilemektedir.

Bu problemler Yöneylem Araştırması literatüründe Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak adlandırılmaktadır. ARP, araçların talebi olan müşterilere hizmet vermek üzere üretim merkezinden çıkış yaptığı ve rotasını tamamladıktan sonra tekrar üretim merkezine döndüğü kombinatorial (*birleşimsel*) optimizasyon problemleridir (Montoya-Torres 2015).

Litertürde birçok ARP türüne dair çalışma yer almaktadır. Yapılan bazı yasal düzenlemeler ve ihtiyaçlar son yıllarda çok aşamalı lojistik dağıtım sistemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Çok aşamalı sistemlerin uygulama alanlarından biri de şehir lojistiğidir (Belgin 2018).

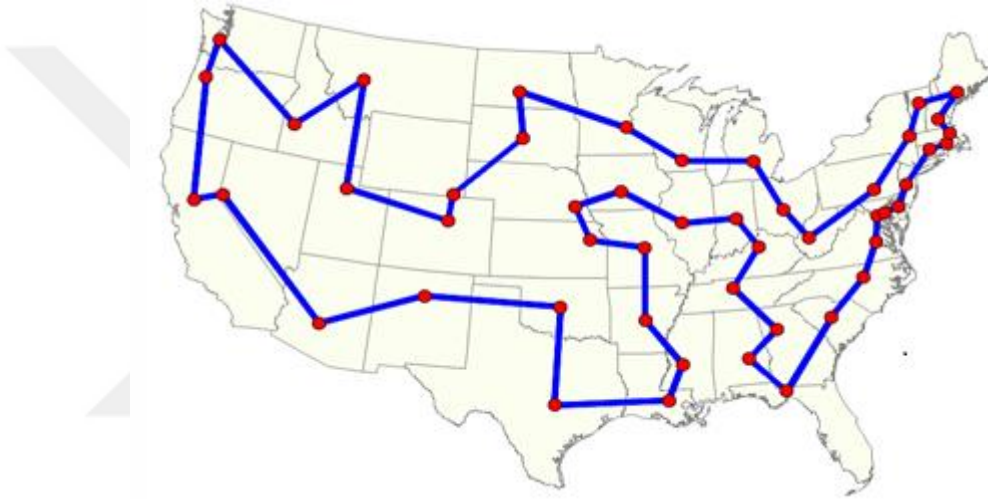
Şehir içinde gürültü kirliliğine, hava kirliliğine ve trafik yoğunluğuna sebep olduğu için çoğu ülkede emisyon miktarı yüksek olan dizel araçların şehir merkezlerine girişinin yasaklanması gibi birtakım düzenlemeler getirilmiştir. Bu durum araştırmacıları şehir lojistiği üzerine çalışmaya teşvik etmiştir. Araştırmacılar, yapılan yasal düzenlemeler ve kısıtlamalar karşısında firmaların lojistik maliyetlerini düşürmek adına şehir lojistiğine çok aşamalı araç rotalama sistemlerinden en yaygın olan, iki aşamalı ağ tasarımı uygulamışlardır.

Şehir lojistiğinde iki aşamalı sistemler; ana depo, uydu depo ve belirli talepleri olan müşteriler, ana depo ve uydu depoda bulunan araçlardan oluşmaktadır. Ana depo, üretimi tamamlanan ürünlerin tutulduğu depolardır. Uydu depo ise, şehir merkezinin etrafındaki sınır bölgelere inşa edilen, ana depolara kıyasla daha küçük olan ara depolardır. Şehir merkezinde bulunan müşterilere hizmet verilirken ilk aşamada ana depodan uydu depolara ürünler dizel araçlar ile taşınmaktadır. Şehir merkezine dizel araçların girişi mümkün olmayacağı için ürünler uydu depodan müşterilere dizel olmayan ve kapasitesi birinci aşamada yer alan dizel araçlardan daha küçük olan araçlar ile taşınmaktadır. İki Aşamalı Araç Rotalama Problemleri (2A_ARP) literatürde ilk olarak Perboli ve diğ. (2007) tarafından ele alınmıştır. Bu tezde ele alınan çalışma 2A_ARP kapsamında bir kentsel lojistik problemidir.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ

2.1 Gezgin Satıcı Problemi

Gezgin bir satıcının bir noktadan başlayarak ziyaret edilmesi gereken noktalar kümesinde her noktayı sadece bir defa ziyaret etmesi şartıyla en kısa mesafe veya en düşük maliyet sağlanacak şekilde tam turunu (tek turda) tamamladığı problemlere Gezgin Satıcı Problemi (GSP) denir. Şekil 2.1 Amerika Birleşik Devletleri haritası üzerinde yer alan noktalar kümesinden oluşan bir GSP örneğini göstermektedir.



Şekil 2.1: Gezgin satıcı problemine genel bakış (Schirber 2017)

GSP’de birden fazla tur oluşumuna izin verilmemektedir ve tek bir tur ile mevcuttaki bütün noktaların ziyaret edilmesi gerekmektedir. GSP’nin matematiksel modeli oluşturulurken alt tur adını verdiğimiz birden fazla turun oluşmaması adına alt tur engelleyici kısıtların matematiksel modele dahil edilmesi gerekmektedir.

Problemin boyutu ve çözüm kümesi hakkında fikir vermesi açısından bahsetmek gerekirse, n şehirli bir GSP’de gezgin satıcının turuna başlayabilmesi için ilk etapta n tane seçeneği olacaktır. n sayıdaki şehirlerden birinin seçilmesinin ardından gezgin satıcının ikinci aşamada ziyaret edebileceği $(n-1)$ sayıda şehir seçeneği olacaktır. İleriki aşamalarda ziyaret edebileceği şehir seçenekleri sırasıyla $(n-2)$, $(n-3)$... 1 olmak üzere son aşamada tek şehir kalana kadar devam edecektir. Özetle, gezgin satıcının ziyaret edebileceği denklem (2.1)’de belirtildiği gibi $n!$ sayıda rota söz konusu olacaktır.

$$n \times (n - 1) \times (n - 2) \times (n - 3) \times \dots \times 2 \times 1 = n! \quad (2.1)$$

GSP’de tüm ağ kapsamında iki düğüm arası mesafe hem ileri yönde hem de tersi yönde birbirine eşitse Simetrik Gezgin Satıcı Problemi, eşit değilse Asimetrik Gezgin Satıcı Problemi olmak üzere GSP ikiye ayrılmaktadır (Aladağ 2010).

GSP, problemin boyutu (şehir sayısı vb. parametreler) arttıkça problemin çözüm kümesinin üssel olarak artmasından dolayı *NP*-zor problem sınıfına girmektedir. Problemin çözüm kümesinin üssel olarak artması ve buna bağlı olarak problemin bilgisayarda çözüm süresinin de üssel olarak artması anlamına gelmektedir. Problemler karmaşıklık açısından gruplara ayrılmaktadır. Bunlardan bazıları açıklamasıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

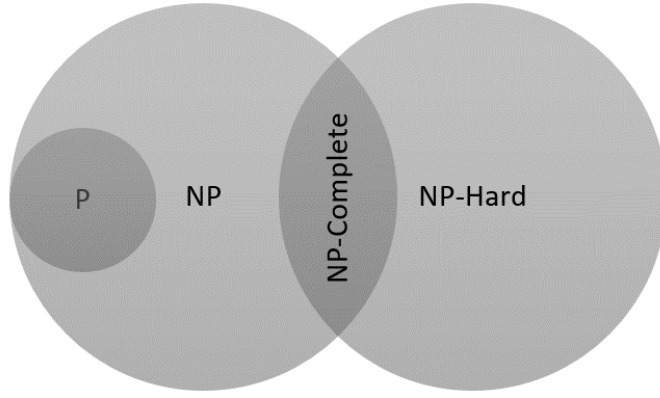
P (Polynomial time) sınıfı problemler: Makul bir süre içerisinde çözülebilen problemlerdir. Toplama, çarpma gibi dört işlem problemler *P* sınıfı problemlere örnektir.

NP (Non-deterministic polynomial time) sınıfı problemler: Çözümü verildiğinde çözümün olurlu bir çözüm olup olmadığının makul bir sürede test edilebildiği, fakat boyutu arttıkça çözüm süresinin üssel olarak artış gösterdiği problemlerdir. *NP* problemler; *NP*-tam problemler ve *NP*-zor problemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

NP-zor (NP-hard) sınıfı problemler: En azından *NP* sınıfı problemler içindeki en zor problem kadar zor olan problemlerdir. Bu problemler *NP* sınıfı problem olabildiği gibi, *NP* sınıfı problem olma zorunluluğu yoktur. *NP*-zor problemler makul (polynomial) bir sürede çözülebilirse, *NP* sınıfındaki bütün problemlerin makul bir süre içerisinde çözülmesi mümkün olacaktır.

NP-tam (NP-complete) sınıfı problemler: Hem *NP* sınıfı hem de *NP*-zor sınıfı problemler grubunda yer alan problemlerdir. *NP* sınıfındaki bütün problemlerin makul (polynomial) bir süreye indirgenebildiği problemlerdir.

Şekil 2.2’de *NP*-karmaşıklık sınıfı problemlerinin kesiştiği ve ayrıldığı noktalar görülmektedir.



Şekil 2.2: NP-karmaşıklık sınıfı

GSP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (2.2) gezgin satıcının sistemdeki müşterileri ziyaret ederken seyahat edeceği toplam mesafenin en küçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıt (2.3) ve kısıt (2.4) sırasıyla her bir şehrin ziyaret edilmesini ve ziyaret edilen her şehirden başka bir şehre gitmek üzere çıkış yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.5) alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.6) aracın ziyaret etmiş olduğu şehirden aynı şehre rota oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.7) iki şehir arasında bağlantı olduğunda 1, aksi durumda 0 değerini alan karar değişkenini ifade etmektedir. Kısıt (2.8) alt tur oluşumunu önleyen yardımcı karar değişkeninin negatif olmamasını sağlamaktadır.

İndisler ve notasyonlar

n = şehir sayısı

N = şehirler kümesi

i, j = şehir $(1, 2, \dots, n)$

Parametreler

d_{ij} = i şehri ve j şehri arasındaki mesafe

M = büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{şehir } i' \text{ den şehir } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i, j \in N$$

U_i = alt turu engellemek için kullanılan değişken

$\forall i \in N$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_i^n \sum_j^n d_{ij} * x_{ij} \quad (2.2)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.4)$$

$$U_i - U_j + n * x_{ij} \leq n - 1 \quad 2 \leq i, j \leq n, i \neq j \quad (2.5)$$

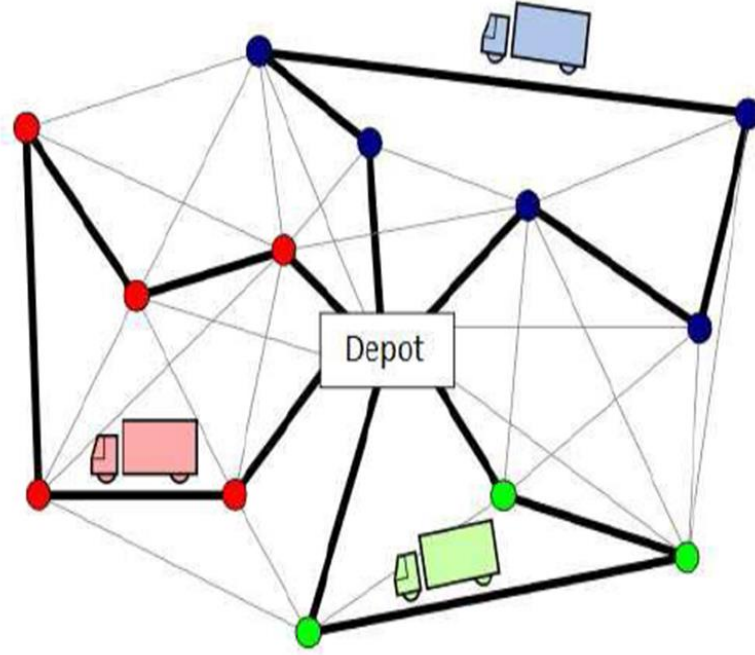
$$d_{ii} = M \quad \forall i \in N \quad (2.6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (2.7)$$

$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (2.8)$$

2.2 Araç Rotalama Problemi

Araç Rotalama Problemleri (ARP), ürünlerin, hizmetlerin, insanların veya taşınabilir her türlü varlık ve nesnelerin belirli arz noktalarından talep noktalarına en kısa mesafe veya en düşük maliyet ile taşınmasının amaçlandığı optimizasyon problemleridir. ARP temel olarak arzın gerçekleştiği düğümler, belirli talepleri olan düğümler ve bu düğümleri birbirine bağlayan rotalardan oluşan problemlerdir. ARP’de ürünlerin araçlara atanması ve rota seçimi söz konusudur. ARP’de, arz noktalarından yola çıkacak olan her bir araca hizmet verecekleri talep noktaları atanır. Araçlara ayrıca belirli sayıda ürünün ataması da yapılır ve talep noktalarına ihtiyaçları kadar miktarda ürün en kısa yol veya en düşük maliyetli rota izlenerek ulaştırılmaktadır. ARP’ye ait genel görünüm Şekil 2.3’teki gibidir.



Şekil 2.3: Araç rotalama problemine genel bakış (Dhawan ve diğ. 2014)

ARP üzerine ilk çalışma Danztig ve Ramser (1959) tarafından yapılmıştır. Bir depo ve $n-1$ sayıda müşteriden oluşan Klasik Araç Rotalama Problemi'ne (K_ARP) ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (2.9) ile araçların müşterileri ziyaret etmek için gideceği toplam mesafenin en küçüklenmesi sağlanmaktadır. Kısıt (2.10), müşterilerin her birinin bir defa ziyaret edilmesini ve ziyaret sonrası araçların depoya dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.11), araçların depodan ve ziyaret edilen müşterilerden çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.12), depodan en fazla araç sayısı kadar rota oluşabileceğini ifade etmektedir. Kısıt (2.13), alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.14), depo ve müşterilerden oluşan bir düğümden başka bir düğüme gidilirken araçta taşınan toplam yükün müşterinin talebinin altında ve araç kapasitesinin üzerinde olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.15), iki düğüm arasında bağlantı varsa 1, aksi durumda 0 değerini alan karar değişkenini ifade etmektedir. Kısıt (2.16), alt tur oluşumunu önlemek için kullanılan karar değişkeninin negatif olmamasını sağlamaktadır. Matematiksel modelin geçerliliği IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımında test edilmiştir.

İndisler ve Notasyonlar

n = depo ve müşterilerden oluşan toplam düğüm sayısı

N = depo ve müşteriler kümesi $(1,2,\dots,n)$

N_c = müşteriler kümesi $(2,3,\dots,n)$

i,j = ağda yer alan depo ve şehirler $(1,2,\dots,n)$

Parametreler

d_{ij} = i düğümü ile j düğümü arasındaki mesafe

M = büyük bir sayı

K = depoda bulunan araç sayısı

Q = depoda bulunan araçların kapasitesi

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{düğüm } i' \text{ den düğüm } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda } (\forall i, j \in N) \end{cases}$$

U_i = i düğümünü ziyaret etmeden önce araçtaki yük miktarı $(\forall i \in N)$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} * x_{ij} \quad (2.9)$$

Kısıtlar

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.10)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} - \sum_{i \in N} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in N \quad (2.11)$$

$$\sum_{j \in N_c} x_{1j} \leq K \quad (2.12)$$

$$U_j - U_i + Q * x_{ij} \leq Q - D_i \quad \forall i, j \in N_c \quad (2.13)$$

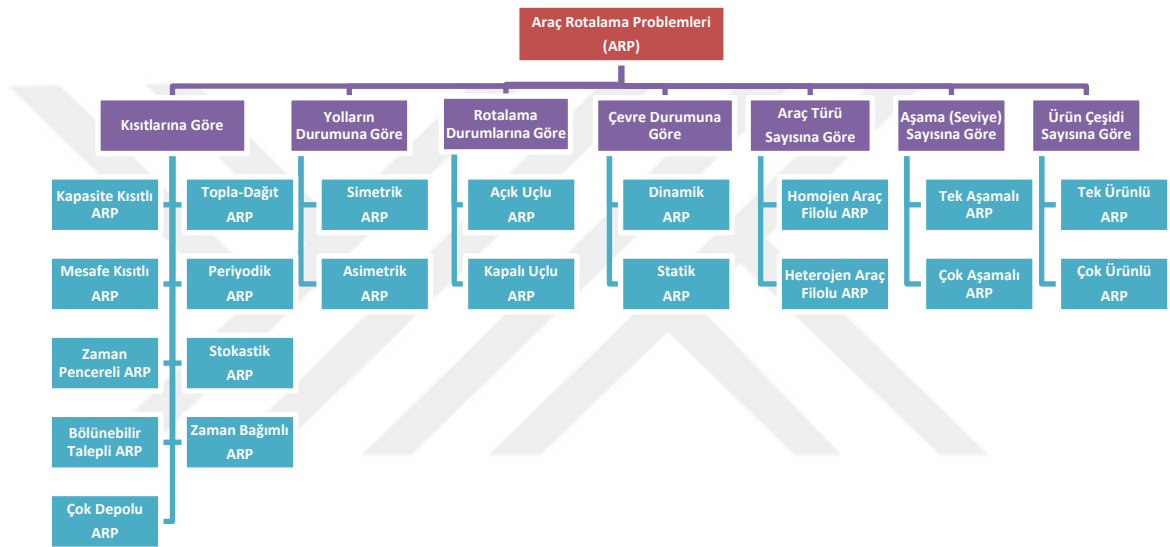
$$D_i \leq U_i \leq Q \quad \forall i \in N_c \quad (2.14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (2.15)$$

$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in N, U_i \in R \quad (2.16)$$

2.3 Araç Rotalama Problemi Türleri

Bu tez kapsamında ARP türlerinin sınıflandırılmasında Atasagun'a (2015) ait tez çalışmasından esinlenilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ARP türleri ana başlıklarıyla ele alınmıştır. Kısıtlarına göre ARP, Yolların Durumuna göre ARP, Rotaların Durumuna göre ARP, Çevre Durumuna göre ARP, Araç Türü Sayısına göre ARP, Aşama (Seviye) Sayısına göre ARP, Ürün Çeşidi Sayısına göre ARP olmak üzere yedi sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Araç rotalama problem türleri (Atasagun 2015)

Kısıtlarına göre Araç Rotalama Problemleri başlıca; Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KPK_ARP), Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (MK_ARP), Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi (ZP_ARP), Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi (BT_ARP), Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇD_ARP), Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_ARP), Periyodik Araç Rotalama Problemi (P_ARP), Stokastik Araç Rotalama Problemi (S_ARP) ve Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi'dir (ZB_ARP) (Atasagun 2015).

Kullanılan araç sayısının ve araçların taşıyabileceği yük miktarının sınırlandırıldığı ARP türüne Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KPK_ARP) denilmektedir. Kullanılan araçların gidebileceği mesafenin belirli bir mesafe ile sınırlandırıldığı ARP türü Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (MK_ARP) olarak

adlandırılmaktadır. Ziyaret edilmesi gereken talep noktalarının sadece belirli zaman aralıklarında ziyaret edilebildiği, belirlenen zaman aralığı dışında ziyaretin mümkün olmadığı veya zaman penceresinin soft (zorunlu olmayan) bir kısıt olduğu durumlarda belirlenen zaman aralığı dışında bir zamanda ziyaretin gerçekleştirilmesi durumunda belirli bir ceza maliyetinin ödendiği ARP türüne Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi (ZP_ARP) denilmektedir. Okul servisi ile öğrenci taşımacılığı ZP_ARP'ye örnektir. Öğrenciler okul servisi tarafından belirli saat aralıklarında duraklarından alınıp ders saati başlamadan önce belirli saat aralığında okula ulaştırılmaktadır. Talepleri olan noktalara hizmet sağlarken en azından bir noktanın talebinin en az iki seferde karşılandığı ARP'ye Bölünebilir Talepli Araç Rotalama Problemi (BT_ARP) denilmektedir. Bu tip problemlere genellikle müşterilerin veya diğer talep noktalarının taleplerinin araç kapasitesinden büyük olduğu durumlarda rastlanmaktadır. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇD_ARP), müşterilerin talebini karşılayabilmek adına kaynak görevi gören depoların sayısının birden fazla olduğu ARP'dir. Bir ARP'de çok depolu bir tasarım olmasının sebebi genellikle müşterilere daha hızlı ve daha düşük maliyetle hizmet verilmek istenmesidir. Depoların kapasitesinin küçük olması ve/veya depoların her birinde sadece tek tip ürünün depolanıyor olması çok depolu ağ tasarımının tercih edilmesinin diğer sebeplerindendir. Müşterilerin talebi doğrultusunda dağıtılması gereken ürünlerin yanı sıra müşterilerden toplanması gereken ürünlerin de mevcut olduğu ARP'ye Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_ARP) denilmektedir. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (EZTD_ARP) ve Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÖDST_ARP) olmak üzere literatürde temel olarak iki çeşit TD_ARP yer almaktadır. Müşteriden ürünler veya parçalar genellikle geri dönüşümde kullanılmak üzere veya doğadan bertaraf edilmek üzere toplanmaktadır. TD_ARP, literatürde yer alan tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zinciri çalışmalarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Klasik ARP'ye karşılık planlama çizelgesinin sadece tek bir zaman periyodunda gerçekleşmediği, birden fazla zaman periyodunda gerçekleştiği ARP'ye Periyodik Araç Rotalama Problemi (P_ARP) denilmektedir. Rotalama her periyot için yapılırken, müşteriler plan çizelgesinde hizmet alacağı bir veya birden fazla periyoda atanmaktadır. Bu problemlerde üç tip karar söz konusudur. Bunlar: her bir müşterinin ziyaret edileceği periyotların belirlenmesi, her bir periyotta hizmet verilecek müşteri kümesinin belirlenmesi ve her kümedeki müşterilerin rotalamasının oluşturulmasıdır (Toth ve Vigo 2014). Problemin parametrelerinden en az birinde rassallığın olduğu

ARP'ye Stokastik Araç Rotalama Problemi (S_ARP) denilmektedir. Bu parametreler başlıca; müşteri sayısı, müşteri talepleri ve müşterilerin hizmet süreleri olabilmektedir. Sistemdeki müşteri sayısının, müşteri talep miktarlarının, müşterilerin hizmet sürelerinin vb. problem parametrelerin olasılıksal olarak meydana geldiği problemler S_ARP'ye örnek gösterilebilmektedir. Problemde düğümler arası seyahat süresinin verildiği veya düğümler arası seyahat süresinin mesafe matrisi ve araçların hızı üzerinden hesaplandığı ve lojistik ağıdaki araçların müşterileri ziyaret ederek turunu en kısa sürede tamamlamaya çalıştığı ARP'ye Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi (ZB_ARP) denilmektedir.

Yolların durumuna göre ARP, iki nokta arasındaki mesafenin ileri ve tersi yönde birbirine eşit olup olmamasına göre ikiye ayrılmaktadır. İki nokta arasındaki mesafe ileri ve tersi yönde aynı olan ARP'ye Simetrik Araç Rotalama Problemi (SM_ARP), iki nokta arasındaki mesafenin ileri ve tersi yönde farklı olduğu ARP'ye ise Asimetrik Araç Rotalama Problemi (ASM_ARP) denilmektedir.

Rotaların durumuna göre ARP, depodan yola çıkan araçların yolculuklarını tamamladıkları noktalara göre ikiye ayrılan ARP'dir. Depodan yola çıkan araçların tekrardan depoya dönme zorunluluğunun olmadığı ARP'ye Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AU_ARP) denilmektedir. AU_ARP ile üçüncü parti lojistik sisteminde karşılaşılmaktadır. Firmalara dış kaynak olarak hizmet veren üçüncü parti lojistik firmalarına ait araçların tekrar depoya dönme zorunluluğu yoktur. Depodan yola çıkan araçların müşterileri ziyaret ettikten sonra tekrar depoya döndüğü ARP'ye Kapalı Uçlu Araç Rotalama Problemi (KU_ARP) denilmektedir. Müşterilere ürünlerin taşınması hususunda kendisine ait araçlarla hizmet veren firmalarda görülmektedir.

Çevre Durumuna Göre ARP, bazı parametrelerin önceden bilindiği ve bilinmediği durumlar olmak üzere ikiye ayrılan ARP'dir. Gerçek hayatta sıkça karşılaşılan Dinamik Araç Rotalama Problemi'nde (D_ARP) müşterilere ait bilgiler önceden kesinlik arz etmemektedir. Araç depodan yola çıktından sonra müşteri bilgileri öğrenilmekte veya güncellenmektedir. Müşteri bilgilerine örnek olarak müşteri talepleri, müşterinin ziyaret edilebileceği zaman aralıkları vs. gösterilebilmektedir. Müşterilere ait bilgiler dışında ağa dair herhangi bir veya birden fazla parametrede anlık olarak meydana gelebilecek değişimlerin (araç sayısındaki değişiklik vs.) olduğu ARP, D_ARP'ye örnek oluşturmaktadır. Önceden probleme

dair bütün parametrelerin belirli olduğu ve sonradan operasyon esnasında değişkenlik göstermediği ARP'ye Statik Araç Rotalama Problemi (ST_ARP) denilmektedir.

Araç türü sayısına göre ARP türleri, lojistik ağ tasarımında kullanılan araçların başta kapasite olmak üzere problemi etkileyebilecek herhangi bir özelliği açısından birbiriyle aynı veya farklı olması durumuna göre ikiye ayrılan ARP'dir. Kapasite ve diğer özellikler bakımından aynı türde araçların kullanıldığı ARP'ye Homojen Araç Filolu Araç Rotalama Problemleri (HMAF_ARP) denilmektedir. Kapasite ve diğer özellikler bakımından birbirinden farklı türde araçların kullanıldığı ARP'ye Heterojen Araç Filolu Araç Rotalama Problemleri (HTAF_ARP) denilmektedir. Örneğin; ulaşım şirketleri şehirlerarası yolcu taşımacılığında yolcularına büyük otobüsler ile hizmet sağlarken, yolcuların otobüs terminalinden çeşitli semtlere ulaşımını daha küçük araçlar ile sağlaması HTAF_ARP'ye örnektir.

K_ARP ve çoğu ARP türü tek aşamalı lojistik sistemlerden oluşmakta iken araştırmacılar bazı durumlarda maliyet açısından daha avantajlı olduğu için lojistik sistemleri birden fazla aşamaya bölerek ele almışlardır. K_ARP'de olduğu gibi müşterilere depodan doğrudan hizmet verildiği ARP'ye Bir Aşamalı Araç Rotalama Problemi (1A_ARP) denilmektedir. Depolar ile müşteriler arasında uydu depoların yer aldığı ARP'ye Çok Aşamalı Araç Rotalama Problemleri (ÇA_ARP) denilmektedir. ÇA_ARP'de ilk aşamada ürünler ana depoda konumlanan birinci grup araçlar ile uydu depolara taşınmaktadır. İkinci ve ileriki aşamalarda, ürünler uydu depolarda bulunan ikinci grup araçlarla müşterilere aktarılmaktadır. Şehir merkezine dizel araçların girişinin Avrupa şehirleri başta olmak üzere dünyadaki çoğu şehirde kısıtlanmaya başlamasıyla birlikte ÇA_ARP'ye, şehir lojistiğine dair literatürde yer alan çalışmalarda sıkça karşılaşılmaktadır.

Ürün Çeşidi Sayısına göre ARP, lojistik ağında araçlar tarafından taşınan ürün çeşitliliğinin sayısına göre ikiye ayrılan ARP türüdür. Depodan müşterilere sadece tek tip ürünün taşındığı ARP'ye Tek Ürünlü Araç Rotalama Problemi (TÜ_ARP) denilmektedir. Depodan müşterilere birden fazla ürünün taşındığı ARP ise Çok Ürünlü Araç Rotalama Problemi (ÇÜ_ARP) olarak adlandırılmaktadır. Çapraz sevkiyat noktalarına birden fazla ürünün taşındığı lojistik sistemleri ÇÜ_ARP'ye örnek gösterilmektedir.

2.4 Kentsel Lojistikte ARP Uygulamaları

Son yıllarda şehir merkezindeki taşımacılık faaliyetlerindeki artış; trafik yoğunluğu, çevre kirliliği, enerji israfı gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Yüksek taşımacılığında sıklıkla kullanılan dizel araçların şehir merkezinde faaliyet göstermesi, trafik yoğunluğuna ve buna bağlı olarak enerji israfına sebep olmaktadır. Aynı zamanda dizel araçlardan kaynaklı havaya salınan yüksek orandaki CO₂ çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Trafik yoğunluğu, çevre ve gürültü kirliliği gibi etmenler şehir merkezindeki insanları da olumsuz yönde etkilemektedir. Şehir içindeki yük taşımacılığına bağlı olumsuz şartları ve taşımacılıkta meydana gelen yüksek maliyetleri düşürmek adına lojistik çalışmalarının yapıldığı alana kentsel lojistik denilmektedir.

Şehir merkezine dizel araçların girişinin kısıtlanmasına dair dünyada ilk uygulama Almanya'nın Hamburg kentinde 2018 yılının Mayıs ayında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu düzenleme ile birlikte Hamburg'ta itfaiye, ambulans, çöp kamyonu, taksi ve şehir merkezinde ikamet eden vatandaşların araçları haricindeki diğer bazı dizel araçların şehir merkezine girişi yasaklanmıştır (Oltermann 2018).

Dizel araçların şehir merkezine girişini kısıtlayan bir diğer uygulama da Hollanda'nın Amsterdam kentinde gerçekleştirilmiştir. Amsterdam'da 2030 yılında şehir merkezine yakıt türü petrol olan tüm araçların şehir merkezine girişinin tamamen yasaklanması hedeflenmektedir. İlk adım olarak 2020 itibarıyla 15 yaşından büyük dizel araçların şehir merkezine girişi yasaklanmış olacaktır (Boffey 2019).

Tez kapsamında ele alınan kentsel lojistik ARP içerisinde beş farklı ARP türünü barındırmaktadır. Probleme dair literatür çalışması yapılırken beş farklı ARP türü dört ARP türüne indirgenerek ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla; ZP_EZTD_ARP, ÇD_ARP, 2A_ARP ve ÇÜ_ARP'dir. Bahsedilen ARP türlerine ilişkin literatürde karşılaşılan problemler Literatür Araştırması bölümünde özetlenmiştir.

Literatürde yukarıda bahsedilen ARP türlerine dair birçok çalışma olsa da, bahsedilen ARP türlerinin hepsini birlikte ele alan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında ele alınan mevcut problem, sistemdeki her bir ürünün hizmetinin

sağlanabildiği birden fazla sayıda ana depodan oluşmaktadır. Ana depolarda birden fazla sayıda aynı kapasiteye sahip araçlar yer almaktadır. Müşterilere ürünler ulaştırılmadan önce ana depodan uydu depolara ve tersi yönde ürün akışı gerçekleşir. Uydu depoların hacimsel kapasiteleri, ağda bulunan müşterilerin taleplerinin hacimsel toplamının belirli olasılıksal değerler ile çarpılıp her bir uydu depoya eşit olarak paylaştırılmasıyla belirlenmektedir. Uydu depolardan belirli talepleri olan müşterilere sadece izin verilen zaman aralığında, belirlenen hizmet süresi kadar hizmet verilecek şekilde ürünler taşınmaktadır. Müşterilerin depolardan kendilerine dağıtılacak ürünler için önceden belirlenmiş adet cinsinden talepleri olduğu gibi müşterilerin kendilerinden toplanması gereken ürünler için de önceden belirlenmiş adet cinsinden talepleri mevcuttur. Ürünlerin araçta kapladığı hacimler dikkate alınmakta olup, araç kapasitelerini aşmamasına dikkat edilmektedir. Bahsedilen varsayımlar ve kısıtlamalar altında ağda yer alan bütün müşterilere hizmet verilirken sistemde yer alan araçların katedeceği toplam mesafenin en küçüklenmesini sağlayacak karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Yukarıda bahsedilen dört ARP türü üzerine literatürde yer alan önemli çalışmalara literatür araştırması bölümünde detaylıca yer verilmiştir.

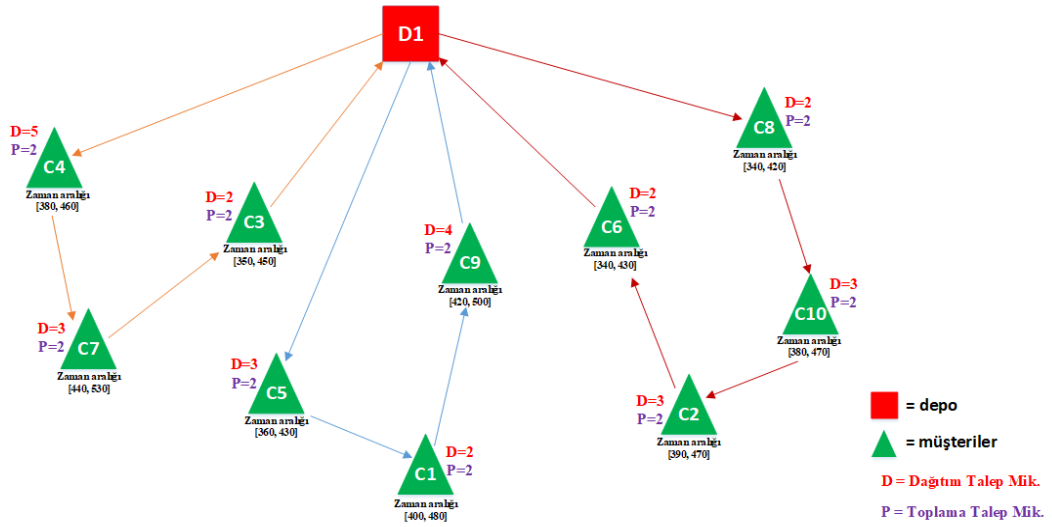
2.4.1 Zaman Pencere Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP

Dağıtım lojistiğinde, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi üreticilerden müşterilere doğru müşteri taleplerini karşılamak için bir akış söz konusudur. Aynı zamanda dünyada birçok kaynağın zamanla azalıyor olmasına bağlı olarak tersine lojistik üzerine de birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Tersine lojistik, müşterilerin kullanmış olduğu ve ömrünü tamamlayan ürünlerin tekrar üretime kazandırılması için tüketicilerden toplanıp üretim merkezlerine taşınması işlemidir. ARP çalışmalarına bakıldığında genellikle ürünlerin depolardan müşterilere iletildiği ileri yönlü rotalamanın dikkate alındığı görülmektedir. Son yıllarda tersine lojistiğin popüler hale gelmesiyle birlikte müşterilerin ileri yönlü talepleri depodan karşılanırken, müşteriden tüketim ömrünü tamamlamış ürünlerin toplanıp depoya taşındığı rotalama problemleri üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Müşterilerin hem dağıtım talebinin, hem de müşterilerden geri dönüşüm için toplanacak ürün talebinin dikkate alındığı ve bir müşteri ziyaret edildiğinde ürün dağıtımı ve ürün toplanmasının eş zamanlı

gerçekleştirildiği problemlere Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP (EZTD_ARP) denilmektedir.

Bazı durumlarda müşterilerin taleplerini karşılarken müşterilerin ziyaret edilebileceği saatler esneklik göstermemektedir. Örneğin; okula gitmesi gereken öğrencilerin okul servisi ile belirli saat aralığında duraklarından alınıp okula ulaştırılması gerekmektedir. Satış yapmak için gün içinde birkaç müşteri ile randevusu olan satış ekibinin müşterileri randevu saatleri içerisinde ziyaret etmesi gerekmektedir. Müşterilerin ziyaret edilmemesinin sadece belirli zaman aralığında mümkün olduğu problemlere Zaman Pencereci ARP (ZP_ARP) denilmektedir.

Literatürde EZTD_ARP ve ZP_ARP'nin birlikte ele alındığı ve çalışıldığı birçok problem yer almaktadır. Bu problemlere Zaman Pencereci Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemleri (ZP_EZTD_ARP) denilmektedir. ZP_EZTD_ARP'ye dair literatürdeki bazı çalışmalara Literatür Araştırması bölümünde yer verilmektedir. Şekil 2.5'te küçük boyutlu bir ZP_EZTD_ARP'nin çözümü sonucu oluşan rotalar gösterilmektedir.



Şekil 2.5: ZP_EZTD_ARP'nin genel görünümü

ZP_EZTD_ARP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Müşterilerin ziyaret edilebileceği zaman aralıkları dakika cinsinden verilmiştir. Ağda yer alan araçların hızı 1 km/dakika olarak kabul edilmiştir. Müşterilerin talepleri ve ziyaret edilebileceği zaman aralıkları ve müşterilere verilecek hizmet süreleri önceden

bilinmektedir. Depoda yer alan araçlar aynı tipte (homojen) olup, araçların yük kapasiteleri önceden bilinmektedir.

Aşağıda verilen üç indisli formülasyonda, amaç fonksiyonu (2.17) depodan çıkan araç veya araçlarla belirli talebi olan müşterilerin her biri bir defa ziyaret edilirken araçların gideceği toplam mesafenin en küçüklenmesidir. Kısıt (2.18), her bir müşterinin bir defa ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.19), ziyaret edilen her bir müşteriden çıkış yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.20) ve (2.21) depoda bulunan araçların sadece ihtiyaç halinde kullanılmasını, ihtiyacın üzerindeki araçların kullanılmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.22), bir elemanlı alt tur oluşumunu yani bir düğümden tekrar aynı düğüme rota oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.23) ve (2.24), müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini sağlamaktadır. Kısıt (2.25), iki nokta arasında seyahat eden araçtaki yük miktarının aracın yük kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.26), (2.27) ve (2.28) müşterilerin hizmet sürelerini de dikkate alarak müşterilerin izin verilen zaman aralığında ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.29) depodan araçların yola çıkış zamanının sıfır kabul edildiğini göstermektedir. Kısıt (2.30), iki düğüm arasında bağlantı olup olmadığını gösteren karar değişkeninin alabileceği değerler kümesini göstermektedir. Kısıt (2.31) ve (2.32) sırasıyla iki düğüm arasında seyahat eden araçlarda bulunan müşterilere dağıtılacak ve müşterilerden toplanacak yük miktarlarını gösteren karar değişkenlerinin negatif olamayacağını ifade etmektedir. Kısıt (2.33) ile bir düğümün ziyaret zamanının negatif olamayacağı ifade edilmektedir.

Kümeler

n = depo ve müşterilerden oluşan toplam düğüm sayısı

n_c = müşteri sayısı

n_k = depoda bulunan hizmet verebilecek toplam araç sayısı

N = depo ve müşteriler kümesi $\{1, \dots, n\}$

N_c = müşteriler kümesi $\{2, \dots, n\}$

N_k = depodaki araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

Parametreler

$d_{ij} = i$ ve j noktaları arasındaki mesafe ($\forall i, j \in N$)

$Q =$ hizmet veren araçların yük taşıma kapasitesi

$s_i = i$ noktası ziyaret edildiğinde verilmesi gereken hizmet süresi ($\forall i \in N$)

$a_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en erken zaman ($\forall i \in N_c$)

$b_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en geç zaman ($\forall i \in N_c$)

$M =$ büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

$$x_{kij} = \begin{cases} 1, & k \text{ aracı } i' \text{ den } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall i, j \in N) \end{cases}$$

$w_i = i$ noktasının ziyaret edildiği zaman ($\forall i \in N$)

$U_{ij} = i' \text{ den } j' \text{ ye giderken araçtaki dağıtılacak toplam yük miktarı } (\forall i, j \in N)$

$V_{ij} = i' \text{ den } j' \text{ ye giderken araçtaki toplanan toplam yük miktarı } (\forall i, j \in N)$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} * x_{kij} \quad (2.17)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} x_{kij} = 1 \quad \forall j \in N_c \quad (2.18)$$

$$\sum_{i \in N} x_{kij} - \sum_{i \in N} x_{kji} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall j \in N \quad (2.19)$$

$$\sum_{j \in N_c} x_{k1j} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.20)$$

$$\sum_{j \in N_c} x_{kj1} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.21)$$

$$\sum_{k \in N_k} x_{kii} = 0 \quad \forall i \in N \quad (2.22)$$

$$\sum_{i \in N} U_{ji} - \sum_{i \in N} U_{ij} = D_j \quad \forall j \in N_c \quad (2.23)$$

$$\sum_{i \in N} V_{ij} - \sum_{i \in N} V_{ji} = P_j \quad \forall j \in N_c \quad (2.24)$$

$$U_{ij} + V_{ij} \leq Q * \sum_{k \in N_k} x_{kij} \quad \forall i, j \in N \quad (2.25)$$

$$w_j \geq w_i + d_{ij} + s_i - M * (1 - x_{kij}) \quad \forall k \in N_k, \forall i \in N, \forall j \in N_c \quad (2.26)$$

$$w_i \geq a_i \quad \forall i \in N_c \quad (2.27)$$

$$w_i \leq b_i \quad \forall i \in N_c \quad (2.28)$$

$$w_1 = 0 \quad (2.29)$$

$$x_{kij} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N \quad (2.30)$$

$$U_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N \quad (2.31)$$

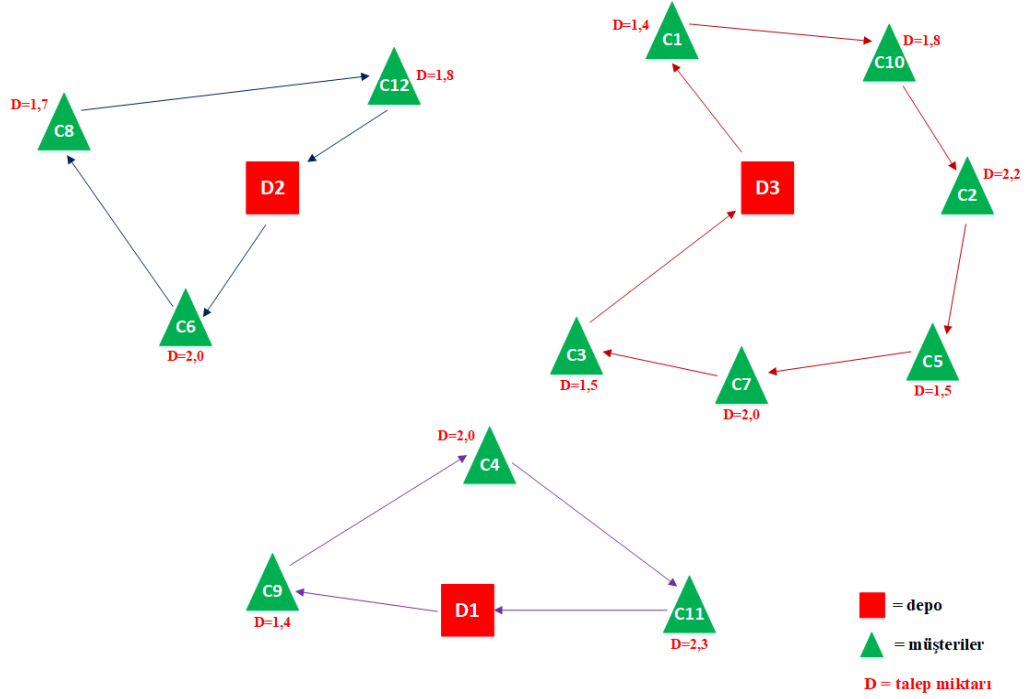
$$V_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N \quad (2.32)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (2.33)$$

2.4.2 Çok Depolu ARP

K_ARP'ye birden fazla deponun ilave edildiği araç rotalama problemleridir. Hizmet verilmesi gereken bazı müşterilerin ana depoya uzak mesafede olması, firmaları müşterilerin ihtiyaçlarının karşılanması doğrultusunda daha hızlı ve daha kaliteli hizmet verebilmesi için birden fazla depodan hizmet sunmaya teşvik etmiştir. Bir dağıtım ağında belirli talebi olan bütün müşterilere çok sayıda bulunan depolardan sadece birinden hizmet verilir. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi'nde (ÇD_ARP) depoların her birinde en az bir araç bulunmaktadır ve araçlar turunu çıkış yaptığı

depoları tamamlamak zorundadırlar. Şekil 2.6’da ÇD_ ARP’ye dair 3 depo ve 12 müşteri den oluşan küçük ç ağı lı bir problemin ç özü mü yer almaktadır.



ÇD_ ARP’ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (2.34), müşterileri ziyaret edip taleplerine cevap vermek üzere depolardan yola çıkan araçların seyahat edeceği toplam mesafenin en küçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıt (2.35), müşterilerin her birinin bir araç ile bir defa ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.36), ziyaret edilen müşteriden ziyareti gerçekleştiren aracın çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.37), depoda bulunan araçların ihtiyaç halinde kullanılmasını ve ihtiyaç yoksa kullanılmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.38), müşterilere hizmet vermesi için kullanılan araçların aynı depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.39), müşteri taleplerinin karşılanması sağlamaktadır. Kısıt (2.40), iki düğüm arası hareket eden araçtaki yük miktarının araç kapasitesini aşmamasını ifade etmektedir. Kısıt (2.41), bir elemanlı alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.42), depolar arası geçişe izin verilmemesini sağlamaktadır. Kısıt (2.43), iki düğüm arasında bağlantı olup olmadığını gösteren karar değişkeninin alabileceği değerler kümesini göstermektedir. Kısıt (2.44), iki düğüm arasında seyahat eden araçtaki yük miktarını gösteren karar değişkeninin negatif olamayacağını ifade etmektedir.

Notasyonlar

n_d = depo sayısı

n_c = müşteri sayısı

n_k = depolarda bulunan toplam araç sayısı

N_D = depolar kümesi $\{1, \dots, n_d\}$

N_C = müşteriler kümesi $\{n_d + 1, \dots, n_d + n_c\}$

N = ana depo ve müşteriler kümesi $\{1, \dots, n_d + n_c\}$

N_k = depodan müşterilere hizmet veren araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

Parametreler

d_{ij} = i ve j noktaları arasındaki mesafe ($\forall i, j \in N$)

Q = depolardaki her bir aracın yük taşıma kapasitesi

Karar Değişkenleri

$x_{kij} = \begin{cases} 1, & k \text{ aracı } i' \text{ den } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall i, j \in N) \end{cases}$

U_{ij} = $i' \text{ den } j' \text{ ye giderken araçtaki dağıtılacak toplam yük miktarı } (\forall i, j \in N)$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} * x_{kij} \quad (2.34)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} x_{kij} = 1 \quad \forall j \in N_c \quad (2.35)$$

$$\sum_{i \in N} x_{kij} - \sum_{i \in N} x_{kji} = 0 \quad \forall j \in N \quad (2.36)$$

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_C} x_{kij} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.37)$$

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_C} x_{kji} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.38)$$

$$\sum_{i \in N} U_{ij} - \sum_{i \in N} U_{ji} = D_j \quad \forall j \in N_C \quad (2.39)$$

$$U_{ij} \leq Q * \sum_{k \in N_k} x_{kij} \quad \forall i, j \in N \quad (2.40)$$

$$x_{kii} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall i \in N \quad (2.41)$$

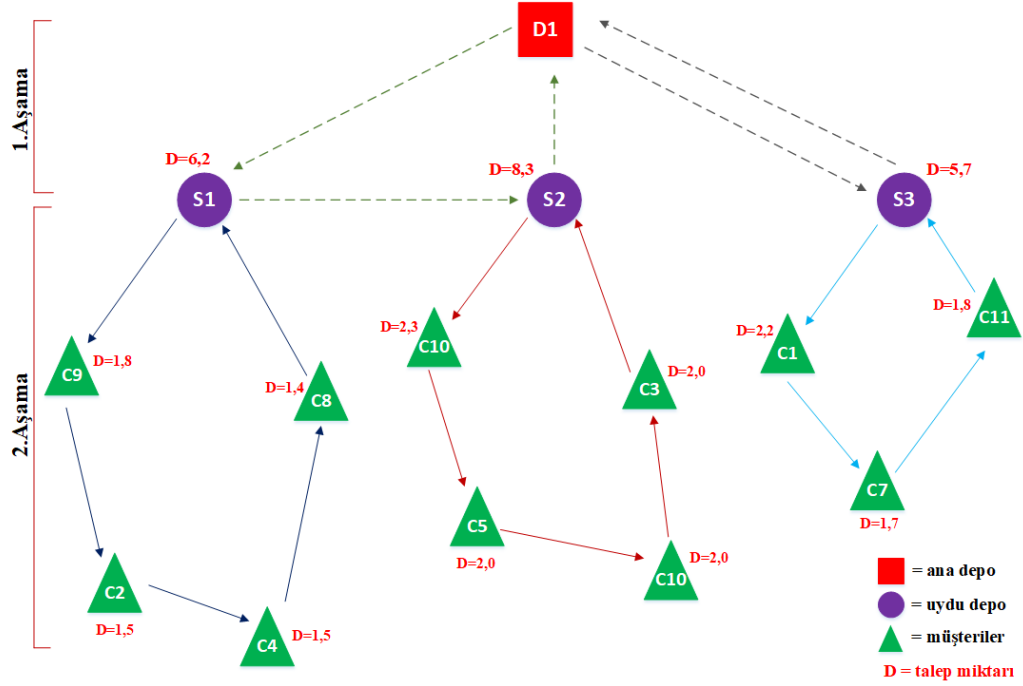
$$x_{kij} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N_D \quad (2.42)$$

$$x_{kij} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N \quad (2.43)$$

$$U_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N \quad (2.44)$$

2.4.3 İki Aşamalı ARP

Son yıllarda üzerine birçok çalışma yapılmış olan ARP türlerinden biri olan İki Aşamalı Araç Rotalama Problemleri'nde (2A_ARP), ilk aşamada ürünlerin ana depodan uydu depolara taşındığı, uydu depoya gelen ürünlerin burada bulunan araçlar ile müşterilere ulaştırıldığı bir ARP türüdür. 2A_ARP ile en çok karşılaşılan uygulama alanlarından biri şehir lojistiğidir. 2A_ARP'ye dair ilk çalışma Perboli ve diğ. (2007) tarafından şehir lojistiği üzerine yapılmıştır. Son yıllarda bazı ülkelerde dizel araçların şehir merkezine girmesini kısıtlayan düzenlemeler yapılmıştır. Bunun üzerine firmaların yasal kısıtlamalar altında müşterilere en düşük maliyetle en kaliteli hizmeti sunabilmesi adına araştırmacıların çoğu şehir lojistiği problemlerine 2A_ARP yaklaşımını önermişlerdir. 2A_ARP'de ilk aşamada ürünler ana depodan uydu depolara kapasitesi büyük dizel araçlarla taşınmakta olup, ikinci aşamada şehir merkezinde bulunan müşterilere ürünler uydu depoda bulunan kapasitesi nispeten daha küçük dizel harici araçlar ile taşınmaktadır. 2A_ARP'ye ait 1 ana depo, 3 uydu depo ve 11 müşteriden oluşan küçük çaplı problemin çözümü Şekil 2.7'de yer almaktadır.



Şekil 2.7: 2A_ARP'nin genel görünümü

2A_ARP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Ana depo sayısı 1 kabul edilmiştir. Müşterilerin talepleri önceden bilinmektedir. Uydu depoların talepleri karar değişkeni olup, her bir uydu deponun talebi o uydu depodan hizmet alan müşteri taleplerinin toplamına eşittir. Kısıtların çoğu tezde ele alınan probleme ait matematiksel modelde kullanılacağı için ileriki bölümlerde açıklanacaktır.

Notasyonlar ve Kümeler

n_s = uydu depo sayısı

n_c = müşteri sayısı

n_k = Birinci aşamadaki araç sayısı

n_v = İkinci aşamadaki araç sayısı

N_s = uydu depolar kümesi $\{2, \dots, n_s + 1\}$

N_c = müşteriler kümesi $\{n_s + 2, \dots, 1 + n_s + n_c\}$

N_{DS} = ana depo ve uydu depo kümesi $\{1, \dots, n_s + 1\}$

N_{SC} = uydu depo ve müşteriler kümesi $\{n_s + 2, \dots, n_s + n_c + 1\}$

N = ana depo, uydu depo ve müşteriler kümesi $\{1, \dots, n_s + n_c + 1\}$

N_k = Birinci aşamada hizmet veren araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

N_v = İkinci aşamada hizmet veren araçlar kümesi $\{1, \dots, n_v\}$

Parametreler

$d1_{ij}$ = Birinci aşamadaki i ve j noktaları arasındaki mesafe

$d2_{lm}$ = İkinci aşamadaki l ve m noktaları arasındaki mesafe

Q_1 = Birinci aşamada hizmet veren araçların her birinin kapasitesi

Q_2 = İkinci aşamada hizmet veren araçların her birinin kapasitesi

CD_i = uydu depo i 'nin kapasitesi

M = büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

$x_{kij} = \begin{cases} 1, & \text{1. aşamada } k \text{ aracı } i' \text{ den } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall k \in N_k, \forall i, j \in N_{DS}) \end{cases}$

$y_{vlm} = \begin{cases} 1, & \text{2. aşamada } v \text{ aracı } l' \text{ den } m' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall v \in N_v, \forall l, m \in N_{SC}) \end{cases}$

$z_{li} = \begin{cases} 1, & \text{2. aşamada } l \text{ müşterisi uydu depo } i' \text{ den hizmet alıyorsa} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall l \in N_c, \forall i \in N_s) \end{cases}$

$U1_{ij}$ = Birinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki yük miktarı $(\forall i, j \in N_{DS})$

$U2_{ij}$ = İkinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki yük miktarı $(\forall i, j \in N_{SC})$

$D1_j$ = uydu depo j 'nin talep miktarı $(\forall j \in N_s)$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} \sum_{j \in N_{DS}} d1_{ij} * x_{kij} + \sum_{k \in N_v} \sum_{l \in N_{SC}} \sum_{m \in N_{SC}} d2_{lm} * y_{vlm} \quad (2.45)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} \leq 1 \quad \forall j \in N_S \quad (2.46)$$

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} \leq M * D_j \quad \forall j \in N_S \quad (2.47)$$

$$\sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} - \sum_{i \in N_{DS}} x_{kji} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall j \in N_{DS} \quad (2.48)$$

$$\sum_{j \in N_S} x_{k1j} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.49)$$

$$\sum_{i \in N_S} x_{ki1} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.50)$$

$$x_{kii} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall i \in N_{DS} \quad (2.51)$$

$$\sum_{i \in N_{DS}} U1_{ij} - \sum_{i \in N_{DS}} U1_{ji} = D1_j \quad \forall j \in N_S \quad (2.52)$$

$$U1_{ij} \leq Q_1 * \sum_{k \in N_k} x_{kij} \quad \forall i, j \in N_{DS} \quad (2.53)$$

$$D1_i \leq CD_i \quad \forall i \in N_S \quad (2.54)$$

$$D1_i = \sum_{l \in N_C} z_{li} * D2_l \quad \forall i \in N_S \quad (2.55)$$

$$\sum_{v \in N_v} \sum_{l \in N_{SC}} y_{vlm} = 1 \quad \forall m \in N_C \quad (2.56)$$

$$\sum_{l \in N_{SC}} y_{vlm} - \sum_{l \in N_{SC}} y_{vml} = 0 \quad \forall v \in N_v, \forall m \in N_{SC} \quad (2.57)$$

$$\sum_{l \in N_S} \sum_{m \in N_C} y_{vlm} \leq 1 \quad \forall v \in N_v \quad (2.58)$$

$$\sum_{l \in N_S} \sum_{m \in N_C} y_{vml} \leq 1 \quad \forall v \in N_v \quad (2.59)$$

$$y_{vii} = 0 \quad \forall i \in N_{SC}, \forall v \in N_v \quad (2.60)$$

$$\sum_{i \in N_S} z_{li} = 1 \quad \forall l \in N_C \quad (2.61)$$

$$\sum_{v \in N_v} y_{vli} \leq z_{li} \quad \forall i \in N_S, \forall l \in N_C \quad (2.62)$$

$$\sum_{v \in N_v} y_{vil} \leq z_{li} \quad \forall i \in N_S, \forall l \in N_C \quad (2.63)$$

$$y_{vlm} + z_{li} + \sum_{\substack{s \in N_S \\ s \neq i}} z_{ms} \leq 2 \quad \forall v \in N_v, \forall l, m \in N_C, \\ l \neq m, \forall i \in N_S \quad (2.64)$$

$$\sum_{i \in N_{SC}} U_{2ij} - \sum_{i \in N_{SC}} U_{2ji} = D_{2j} \quad \forall j \in N_C \quad (2.65)$$

$$U_{2ij} \leq Q_2 * \sum_{v \in N_v} y_{vij} \quad \forall i, j \in N_{SC} \quad (2.66)$$

$$x_{kij} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N_{DS} \quad (2.67)$$

$$D_{1i} \geq 0 \quad \forall i \in N_S \quad (2.68)$$

$$U_{1ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N_{DS} \quad (2.69)$$

$$U_{1i1} = 0 \quad \forall i \in N_S \quad (2.70)$$

$$y_{vlm} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in N_v, \forall l, m \in N_{SC} \quad (2.71)$$

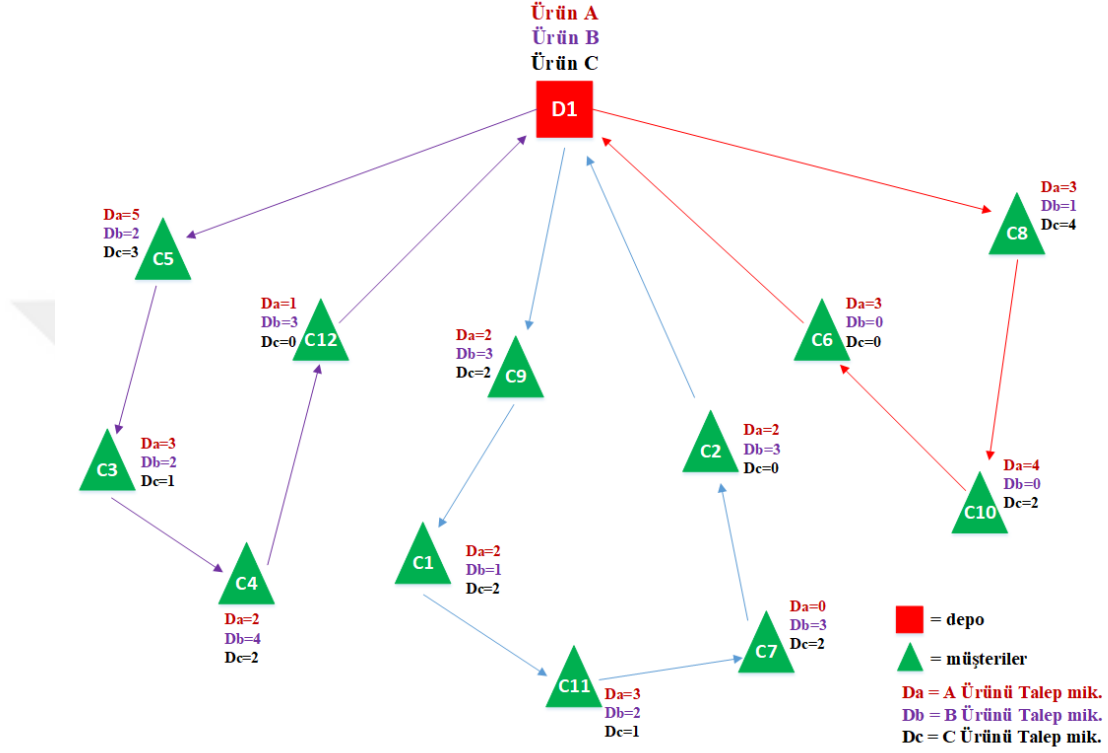
$$U_{2ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N_{SC} \quad (2.72)$$

$$U_{2ij} = 0 \quad \forall i \in N_C, j \in N_S \quad (2.73)$$

$$z_{li} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in N_C, \forall i \in N_S \quad (2.74)$$

2.4.4 Çok Ürünlü ARP

K_arp'de tek tip ürünün olduğu düşünülür. Müşterilerin talebi üzerine bir depodan birden fazla ürün çeşidinin taşındığı araç rotalama problemlerine Çok Ürünlü Araç Rotalama Problemleri (ÇÜ_arp) denilmektedir. ÇÜ_arp'ye ait 3 ürün, 1 depo ve 12 müşteriden oluşan küçük çaplı bir problem çözülmüştür ve çözümü Şekil 2.8'de yer almaktadır.



Şekil 2.8: ÇÜ_arp'nin genel görünümü

ÇÜ_arp'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Matematiksel modelde ürünlerin hacimleri de dikkate alınmıştır. Üç indisli verilen matematiksel modelde amaç fonksiyonu (2.75) daha önceki modellerde olduğu gibi müşterilere hizmet verilirken araçların seyahat ettiği toplam mesafenin en küçüklenmesidir. Kısıt (2.76) ve (2.77) her bir müşterinin ziyaret edilmesini ve ziyaret edilen müşterilerden araçların çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.78) ve (2.79) depodaki araçların ihtiyaç halinde kullanılabilmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.80), müşteri taleplerinin karşılanmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (2.81), seyahat halindeki araçta bulunan yük hacminin aracın kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.82), iki düğüm arasında seyahat eden araçtaki yük miktarının negatif olamayacağını ifade etmektedir. Kısıt (2.83), bir aracın iki düğüm arasında seyahat etme durumunu gösteren karar değişkeninin alabileceği değerleri göstermektedir.

Notasyonlar ve Kümeler

n_c = müşteri sayısı

n_k = depoda bulunan toplam araç sayısı

n_p = depodan hizmeti verilen ürün çeşidi sayısı

N_c = müşteriler kümesi $\{2, \dots, n_c + 1\}$

N = depo ve müşteriler kümesi $\{1, \dots, n_c + 1\}$

N_k = depoda bulunan araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

N_p = depodan hizmeti verilen ürünler kümesi $\{1, \dots, n_p\}$

Parametreler

d_{ij} = i ve j noktaları arasındaki mesafe ($\forall i, j \in N$)

Q = Hizmet veren araçların her birinin hacimsel yük kapasitesi

H_p = p ürününün hacmi

Karar Değişkenleri

$x_{kij} = \begin{cases} 1, & \text{1. aşamada } k \text{ aracı } i' \text{ den } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall k \in N_k, \forall i, j \in N) \end{cases}$

U_{pij} = i' den j' ye giderken araçta taşınan p ürünü adet sayısı ($\forall p \in N_p, \forall i, j \in N$)

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} * x_{kij} \quad (2.75)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} x_{kij} = 1 \quad \forall j \in N_c \quad (2.76)$$

$$\sum_{i \in N} x_{kij} - \sum_{i \in N} x_{kji} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall j \in N \quad (2.77)$$

$$\sum_{j \in N_C} x_{k1j} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.78)$$

$$\sum_{j \in N_C} x_{kj1} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (2.79)$$

$$\sum_{i \in N} U_{pij} - \sum_{i \in N} U_{pji} = D_{pj} \quad \forall p \in N_p, \forall j \in N_C \quad (2.80)$$

$$\sum_{p \in N_p} H_p * U_{pij} \leq Q * \sum_{k \in N_k} x_{kij} \quad \forall i, j \in N \quad (2.81)$$

$$U_{pij} \geq 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i, j \in N \quad (2.82)$$

$$x_{kij} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N \quad (2.83)$$



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde ZP_ARP ve EZ_TP_ARP üzerine birçok çalışma yer almasına rağmen ikisini birlikte ele alan ZP_EZTD_ARP'ye dair çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Erbao ve Mingyong (2010), ileri ve ters lojistiğin entegre olarak ele alındığı EZTD_ARP'yi ZP_ARP ile birlikte ele alarak bir çalışma yapmışlardır. Bu problemin matematiksel modeli oluşturulurken karma tamsayılı doğrusal programlamadan faydalanmışlardır. Araştırmacılar, problemin çözümü için Diferansiyel Evrim Algoritması'nı (DEA) önermişlerdir.

Xie ve diğ. (2013), evde sağlık hizmetleri lojistiğinde karşılaşılan ARP üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada evde sağlık hizmetlerine ait eczanelerden ilaçların ve tıbbi cihazların hastaların evlerine taşınması, bazı özel ilaçların hastaneden hastalara taşınması, hastalardan tıbbi örneklerin, kullanılmamış ilaçların ve tıbbi cihazların toplanması söz konusudur. İleri ve tersine yönlü lojistik çalışmasında hastalar sadece belirli zaman aralıklarında ziyaret edilmesi mümkün olduğu için zaman penceresi kısıtı da probleme dâhil edilmiştir. Araştırmacılar, çözüm yöntemi olarak Genetik Algoritma (GA) ve Yasaklı Arama (YA) algoritmalarını önermişlerdir.

Mu ve diğ. (2015), müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerinin belirli zaman aralığında gerçekleştiği ZP_EZTD_ARP üzerine çalışmışlardır. Kullanılan araçların ve araçların seyahat ettiği mesafeden kaynaklanan toplam maliyetin en küçüklenmesi üzerine matematiksel model oluşturulurken karma tamsayılı doğrusal programlamadan faydalanmışlardır. Bu NP-zor problemin çözümü için Paralel Tavlama Benzetimi (PTB) algoritması önerilmiştir.

Literatürde Çok Ürünlü ARP üzerine birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan başlıcaları aşağıda yer almaktadır.

Salazar-Gonzalez ve Letchford (2015) tarafından literatürde oldukça sık görülen Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi'ne (KPK_ARP) ait matematiksel modele iki yeni çok ürünlü akış formülü ekleyerek yeni model önerisinde bulunmuşlardır. Önerdikleri sürekli gevşetme metodu daha güçlü alt sınırlar ürettiği

için literatürdeki diğer çok ürünli akış formüllerinden daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Moshref-Javadi ve Lee (2016), Bölünebilir Talepli Çok Ürünli Araç Rotalama Problemi (BT_ÇÜ_ARP) üzerine çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar birçok çeşit ürünü farklı kapasitedeki araçlar ile müşterilerine taşıırken müşterilerin bekleme sürelerini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Bir müşterinin talebi birden fazla araç ile karşılanabilmektedir. Araç rotalarının belirlenmesi, araçlara yüklenecek ve araçlardan boşaltılacak ürün miktarlarının belirlenmesi problemin cevap bulmak istediği iki temel değişkendir. Problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında karma tamsayılı doğrusal programlamadan faydalanılmıştır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için Tavlama Benzetimi (TB) VE Değişken Komşuluk Arama (DKA) algoritmalarının birlikte kullanılmasıyla oluşan hibrit algoritma önerilmiştir. Önerilen hibrit algoritmanın, uygulanabilir algoritmalar olan TB, DKA ve En Yakın Komşuluk Algoritması (EYKA) metasezgisel metotlarına göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Cattaruzza ve diğ. (2014), ÇÜ_ ARP ve Çok Turlu Araç Rotalama Problemi'ni (ÇT_ ARP) birlikte ele almıştır. Aynı araçta birlikte taşınamayan ürünler uyumsuz ürünler olarak adlandırılmaktadır. Problemin amacı uyumsuz ürünlere talebi olan müşterilerin talebinin karşılanması için rota planının oluşturulmasıdır. Araştırmacılar rota planına karar verirken kullanılan araç sayısını en küçükmeye çalışmaktadırlar. Araçların gün boyunca çalışma saatleri içerisinde çok sayıda tur yapması serbesttir. Problemin çözümü için Yinelemeli Yerel Arama (YYA) algoritması önerilmiştir.

Bianchessi ve diğ. (2015), BT_ ARP'ye müşterilerin birden fazla ürün talebinde bulunabileceği ürün kısıtını ilave etmiştir. Problem kapsamında müşteriler, normal şartlarda sadece bir defa ziyaret edilebiliyorken, müşterinin birden fazla ürün talebi olması halinde birden fazla ziyaret edilebilmektedirler. Eğer müşteriye birden fazla sayıda ziyaret yapılacaksa her bir ürün çeşidi farklı araçlar tarafından müşterilere taşınacaktır. Problemin matematiksel modelini oluştururken küme bölme yöntemi kullanılmıştır. Problemin çözümü için Dal Fiyat ve Kesme algoritması (DFKA) kullanılmıştır.

Literatüre bakıldığında Çok Depolu Araç Problemi'ne (ÇD_ARP) dair ilk çalışma Laporte ve diğ. (1984) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar, simetrik ÇD_ARP'nin matematiksel modeli oluşturulurken tamsayılı doğrusal programlamadan faydalanmışlardır. Çözüm yöntemi olarak doğrusal programlama gevşetmesinin kullanıldığı dal sınır algoritmasını önermişlerdir.

Demirel ve Yücenur (2011) tarafından ÇD_ARP'ye çözüm yöntemi olarak geometrik şekilli genetik kümeleme algoritması önerilmiştir. Literatürdeki bir dizi problemler kullanılarak önerilen algoritma ile En Yakın Komşuluk Algoritması'nın (EYKA) performansları kıyaslanmıştır. Önerilen algoritmanın en yakın komşuluk algoritmasına göre daha hızlı çözüm verdiği sonucuna varılmıştır.

Kuo ve Wang (2012), ÇD_ARP'ye dair birçok çalışma olsa da yükleme maliyetinin de dikkate alındığı Yükleme Maliyetli Çok Depolu Araç Rotama Problemi'ne (YM_ÇD_ARP) dair ilk çalışmayı gerçekleştirmiştir. Çözüm yöntemi olarak Çok Değişkenli Komşuluk Araması (ÇDKA) algoritmasını kullanmıştır. ÇDKA, üç aşamadan oluşmaktadır. İlki, başlangıç çözümünün stokastik metot ile oluşturulmasıdır. İkincisi, komşuluk çözümlerini araması için dört operatörün rassal olarak seçilmesidir. Üçüncüsü ise komşuluk çözümünün kabulü için Tavlama Benzetimi (TB) algoritmasına benzer bir metodun kullanılmasıdır. Çalışmanın sonucu, önerilen çözüm algoritmasının toplam ulaşım maliyetlerinin düşürülmesi üzerine literatürdeki en çok bilinen çalışmalara göre daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

Salari ve diğ. (2015), ÇD_ARP'yi ele alırken her müşterinin ziyaret edilmesi zorunluluğunu problemden kaldırmıştır. Müşterilerin talepleri iki şekilde karşılanmaktadır. Birincisi, müşteriler ana depolardan çıkan araçlar tarafından doğrudan ziyaret edilmesidir. Diğeri ise müşterinin ziyaret edilmeyip, ilgili müşteriye en yakın başka bir müşterinin ziyaret edilmesi ve talebini daha sonra kendisinin buradan alması için en yakın müşteriye teslim edilmesidir. Problem iki tür karma tamsayılı doğrusal programlama formülü geliştirilmiştir. Çözüm yöntemi olarak GRASP, Yinelemeli Yerel Arama (YYA) ve Tavlama Benzetimi (TB) metasezgisel algoritmalarının birlikte kullanıldığı bir hibrit metasezgisel algoritma kullanılmıştır.

Rahimi-Vahed ve diğ. (2015) tarafından ÇD_ARP'ye Periyodik Araç Rotalama Problemi (P_ARP) dahil ederek literatürde diğ. ARP türleri kadar sık

rastlanmayan Çok Depolu Periyodik Araç Rotalama Problemi (ÇD_P_ARP) üzerine çalışma yapılmıştır. ÇD_ARP, P_ARP ve ÇD_P_ARP için en uygun araç filosu boyutunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Kısıt olarak gerçek hayatta en çok karşılaşılan araç kapasitesi, rota süresi ve bütçe kısıtları dikkat alınmıştır. Çözüm yöntemi olarak Modüler Sezgisel Algoritma'yı (MSA) kullanmıştır.

Yapılacak olan çalışmada, tek aşamalı sistemlere kıyasla daha iyi sonuçlar veren ve çok aşamalı sistemlerden biri olan iki aşamalı lojistik ağı tasarımı kullanılacaktır. İki aşamalı dağıtım sisteminin ilk uygulamasına Jacobsen ve Madsen'in (1980) çalışmasında rastlanmaktadır (Perboli ve diğ. 2011). 2A_ARP'ye ilişkin son on yıla ait literatürde yer alan bazı önemli çalışmalar aşağıda yer almaktadır.

Crainic ve diğ. (2009), yük araçlarının şehir içindeki yoğunluğunu azaltmak amacıyla şehir lojistiği üzerine çalışma yapmışlardır. Şehir lojistiğinin amacı, şehir içinde yük araçlarından kaynaklanan problemleri gidermektir. Buna çözüm olarak çevre dostu araçların kullanıldığı bir entegre lojistik ağ tasarlanmıştır. Bunu yaparken iki aşamalı dağıtım ağından faydalanılmıştır. Elde edilen modelin çözümünde Ayırıştırma Algoritması (AA) kullanılmıştır.

Baldacci ve diğ. (2013) tarafından İki Aşamalı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi'nin (2A_KPK_ARP) kesin çözüm algoritması ile çözümünü ele alınmıştır. Ana depoda bulunan araç filosu ile ürünler uydu depolara getirilmektedir. Uydu depoda bulunan araç filosu ile ürünler müşterilere götürülmektedir. Bu şekilde iki aşamalı bir lojistik ağı söz konusudur. Önerilen matematiksel modelde amaç, araçların gideceği toplam mesafenin ve elleçleme maliyetlerinin en küçüklenmesidir. Çözüm yaklaşımı olarak tercih edilen kesin çözüm algoritması, problemi birden fazla sınırlı sayıda yan kısıtlara sahip çok depolu, kapasite kısıtlı araç rotalama alt problemlerine ayırıştırarak çözüm bulmaya çalışmaktadır.

Soysal ve diğ. (2015), şehir lojistiğinde çok aşamalı dağıtım sistemlerinin son yıllarda artan popüleritesinden bahsetmişlerdir. Çok aşamalı sistemlere olan yönelimin sebebinin, lojistik süreçlerin meydana getirdiği çevresel ve sosyal olumsuz etkiler ve bu etkilerin azaltılmak istenmesi olduğu belirtilmiştir. Yazar bu çalışmada İki Aşamalı Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi'ni (2A_ZB_ARP) ele almıştır. Önerilen matematiksel modeli oluştururken karma tamsayılı doğrusal programlama

kullanılmıştır. Matematiksel modelin içerisinde; araçların tipi, araçların kat ettiği mesafe, araçların hızı, araçların taşıdığı yük, araçların emisyon miktarı ve birçok müşteri yerleşim yerinin saat dilimi dikkate alınmıştır. Hollanda’da faaliyet gösteren bir süpermarket zinciri üzerinde yapılan vaka çalışması sonrasında alınan olumlu sonuç, modelin gerçek hayat problemlerine uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Çalışma, tek aşamalı dağıtım sisteminin daha az maliyetli olmasına rağmen iki aşamalı sistemin daha çevre dostu bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Crainic ve diğ. (2010), literatürdeki diğer iki aşamalı araç rotalama problemi çalışmalarından farklı olarak müşteri dağılımı, lojistik ağ düzeninin tasarımı ve dağıtım sistemine dair maliyetler arasındaki ilişkiyi ele alan ilk çalışma olma özelliği göstermektedir. Bu çalışmada; müşteri dağılımı, uydu depoların yerleşim kuralları, ana depo yerleşim yeri, uydu depo sayısı, uydu depoların ortalama ulaşılabilirliği ve uydu depo ile müşteriler arasındaki ortalama ulaşım maliyetleri parametrelerinin toplam maliyete olan etkisi incelenmiştir. Çeşitli sayıda müşteri ve uydu depo örnekleriyle kıyaslamalar yapılmıştır. Minimum toplam maliyete ulaşana kadar sisteme uydu depo ilave edilmesinin toplam maliyeti düşürdüğü fakat minimum maliyete ulaşıldıktan sonra sisteme uydu depo ilave edilmesinin ise maliyete olumsuz etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Hemmelmayr ve diğ. (2012), iki aşamalı araç rotalama ile yer seçimi ve rotalama problemleri için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Araması (UBKA) sezgisel algoritması yaklaşımı önerilmiştir. İki aşamalı araç rotalama problemi, şehir lojistiği gibi iki seviyeli taşımacılık sistemlerinin olduğu ulaşım ağında ortaya çıkmaktadır. Ele alınan iki aşamalı araç rotalama probleminde literatürdeki diğer iki aşamalı araç rotalama problemlerinden farklı olarak, ilk aşamada ana depolardan uydu depolara hizmet verilirken belirli bir uydu deponun talebi birden fazla araçlara bölünerek taşınabilmektedir. Fakat ikinci aşamada müşterilerin taleplerini karşılarken herhangi bir müşterinin talebinin birden fazla araçlara paylaştırılması söz konusu değildir. Yer seçimi ve rotalama problemleri araç rotalamanın sadece ikinci aşamada uygulandığı iki aşamalı araç rotalama problemlerinin özel bir durumu olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada yeni komşuluk arama operatörleri geliştirilmiş ve aynı zamanda literatürde mevcut olan komşuluk arama operatörlerinden faydalanılmıştır.

Ahmadizar ve diğ. (2015), tedarikçiler, çapraz sevkiyat noktaları ve perakende satış mağazalarından oluşan bir tedarik zincirinde iki aşamalı araç rotalama problemini genetik algoritma metasezgisel yaklaşımı ile çözmeye çalışmıştır. İlk aşamada tedarikçiler ürünleri çapraz sevkiyat noktalarına getirir. Çapraz sevkiyat noktalarında ürünler teslim edileceği perakende satış mağazalarının taleplerine göre konsolide edilerek gruplanır. Beraber konsolide edilmesi gereken ürünlerin aynı anda çapraz sevkiyat noktalarına ulaşmaları halinde ürünler çapraz sevkiyat noktalarında hiç bekletilmeden doğrudan perakende mağazalarına taşınması için hiç bekletilmeden araçlara yüklenmektedir. Aksi takdirde çapraz sevkiyat noktalarına erken ulaşan ürünler burada geçici olarak depolanır ve depolama maliyeti oluşur ya da çapraz sevkiyat noktalarına erken ulaşan ürünler doğrudan araçlara yüklenip perakende mağazalarına önden gönderilir ve bu da taşımacılık maliyetinde artışa sebep olur. Çalışmada operasyonlar arası depolamanın minimum seviyede tutulması istenmiştir. Ulaşım maliyetleri ve ürünlerin farklı tedarikçilerden farklı fiyata alınabileceği dikkate alınarak, tedarikçiler ile çapraz sevkiyat noktaları ve çapraz sevkiyat noktaları ile müşteriler arası araçların izleyeceği rotalar belirlenir. Modelin amacı, çapraz sevkiyat noktasına gelen ve buradan çıkan araçların kullanacağı rotaların optimize edilmesi için tedarikçilere ve çapraz sevkiyat noktalarına ürünlerin atamasının yapılması ve ürünün satın alma maliyeti, ürünü ulaştırma ve stok maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin en küçüklenmesi için ürünlerin konsolide edilmesidir.

Li ve He (2019), ekin biçme ve ulaşım problemini dinamik uydu depolu, çok turlu, iki aşamalı araç rotalama problemi olarak ele almışlardır. İlk etapta biçerdöverler tarlalar üzerinde belirli rotaları izleyerek mahsulü ekinleri biçme işlemini bitirmiş oldukları noktalarda toplar. Biçerdöverlerin topladığı hububatı taşıyıcılara yüklediği bu noktalar değişkenlik gösterdiği için problemde dinamik noktalar olarak isimlendirilmiştir. İkinci aşamada, hububat problemde uydu depo adı verilen bu noktalardan depolara taşıyıcılar tarafından taşınır. Problemin özellikleri göz önüne alınarak karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Probleme çözüm olarak araştırmacılar memetik algoritma sezgisel metot yaklaşımını önermişlerdir.

Belgin ve diğ. (2018), iki aşamalı eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi üzerine çalışmışlardır. Hem ilk aşamada hem ikinci aşamada topla dağıt işlemleri aynı araçlar tarafından yapılmaktadır. Problemi çözmek için ilk olarak düğüm bazlı

matematiksel model önerilmiş ve modeli kuvvetlendirmek adına literatürde bulunan üç adet geçerli eşitsizlik modele uyarlanmıştır. Problemin NP-zor bir problem olmasından dolayı değişken komşuluk iniş ve yerel aramaya dayanan hibrit sezgisel algoritma kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda geçerli eşitsizliklerin matematiksel modeli güçlendirmede önemli etkisi olduğu ve kullanılan hibrit sezgisel algoritmanın probleme iyi çözümler bulduğu sonucuna varılmıştır.

Breunig ve diğ. (2019), ekonomik açıdan avantajlı olmasından dolayı ve taşımacılıkta kullanılan büyük dizel araçların insan yoğunluğunun fazla olduğu şehir merkezlerinden uzakta tutulmasına katkısı olan iki aşamalı dağıtım sistemi üzerine çalışma yapmışlardır. Şehir merkezinden biraz dışarıda olan uydu depolara ürünler büyük dizel araçlar vasıtasıyla getirilir. Ürünler uydu depodan müşterilere elektrikli araçlar ile iletilir. Boyutunun küçük olması, hava kirliliğine sebep olmaması ve gürültüsüz çalışması gibi nedenlerden dolayı ürün taşımacılığında müşteriye teslimatın yapıldığı son aşamada elektrikli araçların kullanımı şirketler arasında yaygınlaşmıştır. Ele alınan araç rotalama probleminin çok aşamalı olması ve elektrikli araçların müşterilere hizmet verdiği rotalar üzerinde şarj istasyonlarına uğrayıp pilini doldurma ihtiyacının bulunması gibi faktörler problemi daha karmaşık hale getirmekte ve problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Problemde bu zorlukların üstesinden gelmek adına büyük değişken komşuluk metasezgisel algoritması ve ayrıştırma tekniklerini kullanan kesin matematiksel model algoritması kullanılmıştır. Çözüm olarak sunulan bu algoritmalar probleme optimum veya optimuma yakın çözümler üretmiştir.

Yang ve diğ. (2019), elektrikli araçlar için batarya değişiminin yapıldığı istasyonları içeren şehir lojistiğinde 2A_KPK_ARP'yi ele almışlardır. İki aşamada faaliyet gösteren araçların yük kapasiteleri, bataryalarının gidebileceği mesafe, güç tüketim oranları ve batarya değişim maliyetleri aşamalar arasında farklılık göstermektedir. Araştırmacılar problemi modellerken tam sayılı matematiksel modelden faydalanmışlardır. Problemin çözümüne sütun türetme ve uyarlanmış büyük değişken komşuluk arama algoritmalarının birleşiminden elde edilmiş bir hibrit algoritma ile katkıda bulunmuşlardır. Ayrıca, duyarlılık analizi çalışması yapılarak araçların bataryasının gidebileceği mesafe ile araçların emisyon miktarının düşürülmesi arasındaki ilişkiyi keşfetmişlerdir.

Cerda ve diğ. (2011), çok aşamalı araç rotalamayı çapraz sevkiyatın olduğu tedarik zincirinde uygulamıştır. Tedarik zincirinde çok aşamalı araç rotalama problemini çalışan araştırmacılar ulaşım maliyetlerini düşürmeyi amaçlamışlardır. Tedarik zinciri; tedarikçiler, üreticiler, depolar ve müşteriler dört ana bileşeninden oluşmaktadır. Sanayi şirketleri; hammaddenin tedarikçilerden satın alınması, ürünlerin üretilmesi, bitmiş ürünlerin depolanması ve müşteriye ulaştırılması gibi bir dizi faaliyetleri gerçekleştirmesi gerekir. Tedarik zincirinde satın alma, üretim, depolama ve dağıtım olmak üzere dört ana işlem meydana gelmektedir. Bunlardan dağıtım faaliyeti hem parçaların ve/veya hammaddelerin tedarikçilerden fabrikalara taşınması hem de nihai ürünlerin fabrikalardan talep noktalarına ulaştırılmasını ifade etmektedir. Tedarik zinciri yönetimi ile operasyonel maliyetlerin düşürülüp, müşteri hizmet seviyesinin artırılması, sistem içinde materyal ve bilgi akışının etkin bir şekilde kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Çapraz sevkiyat ise depolamadan farklılık gösteren bir tür lojistik tekniğidir. Çünkü çapraz sevkiyat noktalarında ürünler depolanmamaktadır. Çapraz sevkiyat noktasında gelen ürünler burada müşteri taleplerine göre konsolide edilir ve hemen talep noktalarına iletilmek üzere fazla bekletilmeden müşterilere araçlar ile gönderilir. Tedarik zincirinde ürünlerin talep noktalara iletilmesi doğrudan veya ara tesisler üzerinden gerçekleşmektedir. Ara tesisler genellikle dağıtım merkezleri ve depolardır. Farklı tedarikçilerden gelen farklı ürünlerin konsolide edilmesinin kolaylaştığı ve yoğun talep döneminde ürün stokunun yapıldığı ara tesisler, tedarikçi ve müşteri arasında ara bir lokasyon gibi davranmaktadırlar. Bu şekilde ara tesis açma maliyetinin meydana gelmesi ve bu noktalarda yapılan stoklara bağlı olarak ürün stok maliyetinin artmasına rağmen ulaşım maliyetleri düşürülmüş ve müşteri ihtiyaçlarına daha hızlı cevap verilebilir hale gelinmiştir. Problemi modellerken karma tamsayılı doğrusal programlama yönteminden faydalanılmıştır.

Billaut ve diğ. (2013), Fransa’da hastaneler zinciri olan Tours hastanelerinde meydana gelen bir lojistik problemini ele almışlardır. İlgili problem iki seviyeli araç rotalama problemi olarak değerlendirilmiştir. Problem; zaman penceresi, heterojen araç filosu, çok depolu, çok ürünlü, bölünebilir talepli bir araç rotalama problemidir. Bu lojistik ağında ilk aşamada ilaçlar, temiz yatak çarşafı, tabldot yemek, hasta dosyaları depolardan hastanelere taşınır, kirli yatak çarşafı ve diğer atıklar toplanır. Problemin ikinci seviyesinde ise büyük hastane birimleri içerisinde çalışanların binalar arasındaki rotalaması yapılır. Ek olarak, şoförlerin ve hastane içindeki depoda

Çalışanların planlaması yapılır ve sayısına karar verilir. Problemi zmk adına genetik ve yasaklı arama metasezgisel algoritmaları önerilmiştir. Problemin çözümünde genetik algoritmanın en iyi çözümü verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Gelecek çalışmalarda daha iyi çözüm bulması adına önerilen iki metasezgisel algoritmadan oluşan bir hibrit algoritmanın kullanılmasına odaklanılacağı belirtilmiştir.

Karaoğlan ve diğ. (2013), genellikle sivil ve askeri taşımacılıkta ortaya çıkan kendi alanında ilk çalışma olan hat zaman pencereli iki aşamalı araç rotalama problemi üzerine çalışmıştır. Hat zaman pencereli araç rotama problemleri standart zaman pencereli araç rotalama problemlerine benzerlik göstermektedir. Hat araç rotalama problemlerinde belirlenen rotaların belirli saatler haricinde kullanılamaması söz konusudur. Örneğin, askeri lojistik ağında Türkiye'nin doğu illerinin merkezleri ile ilçeleri arasındaki yollar potansiyel açıdan pusuya düşürülmeye müsait noktalardır. Bu yollar üzerinde olası terör saldırılarından korunmak amacıyla bu rotaların gündüz gün ışığında kullanılması önem arz etmektedir. Sivil taşımacılıkta ise, sabah ve akşam trafik yoğunluğunun olduğu 7-10 ve akşam 4-7 saatleri arasında kamyon ve tırların şehir merkezlerine girmesi kanunlar tarafından yasaklanmıştır. Bu saatlerde şehir merkezi bağlantılı rotaların kullanılması devlet tarafından yapılan düzenlemeler ile yasaklanmıştır. İki örnekten de görülen durumlar hat zaman pencereli araç rotalama problemini doğurmuştur. Araştırmacılar zm yöntemi olarak karma tamsayılı doğrusal programlama ve memetik algoritma önerilmiştir. Önerilen zm yöntemlerinin kalitesi literatürdeki mevcut test problemler kullanılarak gözlemlenmiştir. Önerilen karma tamsayılı doğrusal programlama ile 25 ve 60 düğümlü problemlerde ve bazı 100 düğümlü problemlerde en iyi çözüme ulaşılabilmemiştir. Memetik algoritmanın ise kısa bir sürede kaliteli çözümler üretebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Baldacci ve diğ. (2018), e-ticaretin tüketiciler arasında popüler hale gelmesi ve tüketicilerin satın almış olduğu ürünlerin dağıtımında ortaya çıkan şehir lojistiği problemini ele almıştır. Çoğu iki aşamalı araç rotalama problemlerinde olduğu gibi ilk aşamada ürünler birden fazla sayıda bulunan depolardan uydu depolara ve ikinci aşamada uydu depolardan müşterilere taşınması şeklindedir. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan müşterilerin tercihinine bağlı olarak müşterilerin teslimatlarını ara toplama tesislerine uğrayıp kendilerinin alabilmesidir. 2015 yılında in'de e-

ticaret ile 20,6 milyar paket ürün satın alındığı belirtilmiştir. Bu rakamın gelecek 5 sene içinde günde 2 milyar paket ürüne çıkacağı öngörülmüştür. Müşterilere ürünleri ulaştırmak için kullanılan araçların şehir içinde trafiğe ve çevreye sebep olacağı olumsuz etkileri azaltmak adına araştırmacılar problemi iki aşamalı araç rotalama problemi olarak ele almışlardır. Ürünlerin müşterilere daha hızlı ulaştırılması için müşterilere ürünleri toplama noktalarından gelip alma opsiyonu da sağlanmıştır. Günümüzde ülkemizde de bazı e-ticaret sitelerinde de aynı hizmetin mümkün olduğu görülmektedir. Probleme çözüm olarak hibrit çok popülasyonlu genetik algoritma metasezgisel yöntemi önerilmiştir.



Tablo 3.1: Literatürde 2A_ARP üzerine dair yapılmış çalışmalar

	Kapasiteli ARP	Zaman kısıtlı ARP	Zaman pencereli ARP	Hat zaman pencereli ARP	Hizmet süreli ARP	Bölünmüş talepli ARP	Çok depolu ARP	Topla dağıt ARP	Zaman bağımlı ARP	Senkronize ARP	Yeşil ARP	Simetrik ARP	2-aşamalı ARP	Çok aşamalı ARP	Dinamik ARP	Statik ARP	Homojen araç filolu ARP	Heterojen araç filolu ARP	Çok tur'lu ARP	Çapraz sevkiyat	Çok ürünlü ARP
Crainic ve diğ. 2009	X		X				X			X			X					X	X		
Jepsen ve diğ. 2013	X											X	X								
Perboli ve diğ. 2010	X												X								X
Baldacci ve diğ. 2013	X												X				X				
Santos ve diğ. 2013	X												X								
Sitek ve Wikarek 2014	X												X								
Soysal ve diğ. 2015	X								X		X		X				X				
Crainic ve diğ. 2008 ^a	X												X				X				
Crainic ve diğ. 2010	X												X				X				
Hemmelmayr ve diğ. 2012	X												X								
Grangier ve diğ. 2016	X		X							X			X						X		
Billaut ve diğ. 2013	X		X			X	X						X					X			X
Breunig ve diğ. 2016	X												X								
Zeng ve diğ. 2014	X												X								
Karaoğlu ve diğ. 2013	X			X									X								
Ahmadizar ve diğ. 2015	X												X					X		X	
Crainic ve diğ. 2012	X												X								
Meihua ve diğ. 2011	X												X								
Perboli ve diğ. 2011	X												X								

Tablo 3.1: Literatürde 2A_ARP üzerine yapılmış çalışmalar (devam)

	Kapasiteli ARP	Zaman kısıtlı ARP	Zaman pencereli ARP	Hat zaman pencereli ARP	Hizmet süreli ARP	Bölünmüş talepli ARP	Çok depolu ARP	Topla dağıt ARP	Zaman bağımlı ARP	Senkronize ARP	Yeşil ARP	Simetrik ARP	2-aşamalı ARP	Çok aşamalı ARP	Dinamik ARP	Statik ARP	Homojen araç filolu ARP	Heterojen araç filolu ARP	Çok turlu ARP	Çapraz sevkیات	Çok ürünli ARP
Crainic ve diğ. 2011	X												X								
Cerda ve diğ. 2011	X		X		X	X		X						X		X				X	X
Crainic ve diğ. 2012	X												X			X					
Raidl and Hu 2014	X												X								
Crainic ve diğ. 2008 ^b													X								
Perboli ve diğ. 2009	X												X								
Zhong ve diğ. 2017	X												X			X					
Wang ve diğ. 2017	X										X		X								
Eitzen ve diğ. 2017	X												X				X				X
Li ve diğ. 2016	X	X								X			X								
He ve Li 2019													X		X						
Li ve diğ. 2019		X											X								
Belgin ve diğ. 2018								X					X								
Dellaert ve diğ. 2018	X		X										X								
Liu ve diğ. 2018	X												X								
Baldacci ve diğ. 2018							X						X								
Breunig ve diğ. 2019													X								
Jie ve diğ. 2019	X										X		X								

4. İKİ AŞAMALI ZENGİN ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

4.1 Problemin Tanımı

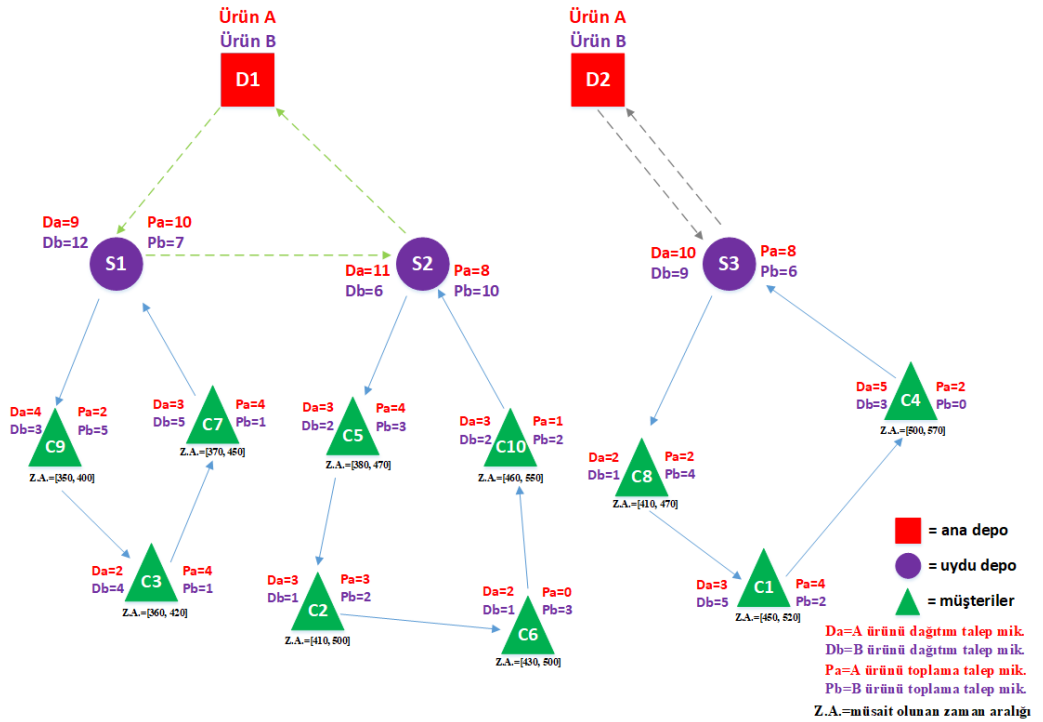
Tez kapsamında çalışılacak olan problemde önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılan 2A_arp, ÇD_arp, ÇÜ_arp ve ZPTD_arp birlikte ele alınmaktadır. Problem, ana depodan uydu depolara, uydu depolardan müşterilere ürün akışının olduğu iki aşamalı sistem olarak değerlendirilmektedir. Ana depolarda ve uydu depolarda hizmet vermek üzere bekleyen kendi içinde aynı tip (*homojen*) olan araçlar mevcuttur. İlk aşamada hizmet verecek olan homojen araçların yük kapasitesi uydu depoda yer alan homojen araçların yük kapasitesinden daha büyüktür. Depoların her birinden her tipte ürünün hizmeti sağlanabilmektedir. Müşterilerin ürünler için dağıtım ve toplama talepleri önceden bilinmektedir. Uydu depoların taleplerine model karar vermektedir. Uydu depoların ve müşterilerin talepleri adet cinsinden olup, ürünlerin taşınırken hacimleri dikkate alınmıştır. Müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini karşılamak adına ürünler ana depoda bulunan araçlar ile uydu depolara taşınmaktadır. Uydu depoların talep miktarı kapasitesini aşmayacak şekilde hizmet vereceği müşterilerin talepleri toplamı kadar olmaktadır. Uydu deponun talepleri bölünebilir olmamakla birlikte her bir uydu depo herhangi bir ana depodan çıkış yapan en fazla bir araç tarafından ziyaret edilip hizmet görmektedir. İkinci aşamada müşterilerin bir araç tarafından sadece bir kez ziyaret edilerek dağıtım ve toplama taleplerinin eş zamanlı olarak karşılanması gerekmektedir. Müşterilerin ziyaret edilmesinin mümkün olduğu zaman aralıkları önceden bilinmektedir. Sistemde yer alan bütün araçların hızı 1 km/dakika olarak sabit kabul edilmektedir. Birinci aşamada ana depolardan uydu depolara taşınan ürünler aynı günün dağıtım ürünü iken, uydu depodan eş zamanlı toplanan ürünler ise bir önceki günün toplanan ürünleridir.

Tez kapsamında önerilen üç indisli formülasyona sahip matematiksel model literatürdeki iki aşamalı araç rotalama modellerinden farklı olarak uydu depoların talebi olmaması halinde talebi olmayan uydu depoların birinci aşamada ana depodan çıkış yapan araçlar tarafından ziyaret edilmemesi gerektiğini dikkate almaktadır.

Önerilen modelin farklılık gösterdiği bir diğer nokta ise iki aşamalı sistemde ürünlerin hacimlerini ve birden fazla tipte ürün çeşidini dikkate alıyor olmasıdır.

4.2 Matematiksel Model

2A_Z_ARP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Matematiksel model oluşturulurken Belgin ve diğ. (2018) makalesindeki karma tamsayılı matematiksel model temel alınmıştır. Bu tez kapsamında önerilen matematiksel modelin geçerliliği Dellaert ve diğ. (2018) ve Polat ve diğ. (2015) makalelerinde yer alan problemler üzerinde test edilmiş, aynı sonuçlar elde edilmiş ve böylece matematiksel model doğrulanmıştır. 2A_Z_ARP'ye ait 2 ürün, 2 ana depo, 3 uydu depo ve 10 müşteriden oluşan küçük çaplı bir problem çözülmüş ve çözüm sonucu oluşan rota Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1: 2A_Z_ARP'nin genel görünümü

Amaç fonksiyonu (4.1), ana depolardan uydu depolar aracılığı ile müşterilere hizmet verirken araçların birinci ve ikinci aşamada katettiği toplam mesafenin en küçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıt (4.2) ve (4.3), uydu depoların dağıtım veya toplama talebinin olması durumunda ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (4.4),

ziyaret edilen her uydu depodan çıkış yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.5) ve (4.6), ana depodaki araçların ihtiyaç halinde kullanılması sağlamaktadır. Kısıt (4.7), ana depolar arası geçişe izin verilmediğini ifade etmektedir. Kısıt (4.8) ve (4.9), uydu depoların varsa dağıtım ve toplanacak ürün taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.10) ve (4.11), sırasıyla ilk aşamada ana depoya geri dönen araçlarda bulunan dağıtılacak yükün ve ana depodan çıkış yapan araçlarda bulunan toplanan yükün olmadığını ifade etmektedir. Kısıt (4.12), araçtaki toplam yükün aracın kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.13), her bir uydu deponun dağıtım ve toplanacak ürün talepleri toplamının uydu depoların kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.14) ve (4.15), uydu depoların dağıtım ve toplanacak ürün talebinin hizmet vereceği müşterilerin talepleri toplamı kadar olmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.16) ve (4.17), sırasıyla ikinci aşamada her bir müşterinin bir araç ile bir defa ziyaret edilmesini ve ziyaret edilen müşterilerden araçların çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.18) ve (4.19), uydu depolarda bulunan araçların her birinin sadece ihtiyaç halinde kullanılmasını aksi takdirde kullanılmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.21) (4.22) (4.23) bir uydu depodan çıkış yapan aracın turunu farklı uydu depolarda tamamlamasını önlemektedir. Kısıt (4.24) ve (4.25), müşterilerin dağıtım ve toplanacak ürün talebinin karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.26), ikinci aşamada müşterilere hizmet verdikten sonra uydu depoya dönüş yapan araçlarda dağıtılacak ürünün kalmayacağını ifade etmektedir. Kısıt (4.27), ikinci aşamada müşterilere hizmet vermek için uydu depolardan çıkış yapan araçlarda o anda toplanan ürün miktarının sıfır olduğunu ifade etmektedir. Kısıt (4.28), ikinci aşamada araçlarda bulunan yük miktarının aracın kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.29), ilk aşamada talebi olmayan uydu depoların ziyaret zamanının sıfır olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Kısıt (4.30), (4.31) ve (4.32), düğümler arası ulaşım sürelerini ve uydu depolar ile müşterilerin hizmet sürelerini dikkate alarak uydu depolara ve müşterilere araçların hizmet vermeye başladığı zamanın hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.33) ve (4.34), müşterilerin hizmet almaya uygun olduğu zaman aralığında ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (4.35) ve (4.36), birinci aşamada ve ikinci aşamada bir elemanlı alt tur oluşumunu yani bir düğümden aynı düğüme rota oluşumunu önlemektedir. Kısıt (4.37), ana depolardan araçların çıkış zamanının sıfır olduğunu ifade etmektedir. Kısıt (4.38), (4.39), (4.40), (4.41) birinci aşamada ve ikinci aşamada araçlarda herhangi bir anda bulunan yük miktarını ifade eden karar değişkenlerinin negatif olamayacağını

ifade etmektedir. Kısıt (4.42), bir düğümün ziyaret edildiği zamanı gösteren karar değişkeninin negatif olamayacağını ifade etmektedir.

Notasyonlar ve Kümeler

n_d = ana depo sayısı

n_s = uydu depo sayısı

n_c = müşteri sayısı

n_p = ürün çeşidi sayısı

n_k = Birinci aşamadaki mevcut araç sayısı

n_v = İkinci aşamadaki mevcut araç sayısı

N_D = ana depolar kümesi $\{1, \dots, n_d\}$

N_S = uydu depolar kümesi $\{n_d + 1, \dots, n_d + n_s\}$

N_C = müşteriler kümesi $\{n_u + 1, \dots, n_d + n_s + n_c\}$

N_{DS} = ana depolar ve uydu depolar kümesi $\{1, \dots, n_d + n_s\}$

N_{SC} = uydu depolar ve müşteriler kümesi $\{n_s + 1, \dots, n_d + n_s + n_c\}$

N = ana depolar, uydu depolar ve müşteriler kümesi $\{1, \dots, n_d + n_s + n_c\}$

N_k = Birinci aşamada ana depolarda bulunan araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

N_v = İkinci aşamada uydu depolarda bulunan araçlar kümesi $\{1, \dots, n_v\}$

Parametreler

$d1_{ij}$ = Birinci aşamadaki i ve j düğümleri arasındaki mesafe

$d2_{lm}$ = İkinci aşamadaki l ve m düğümleri arasındaki mesafe

Q_1 = Birinci aşamada hizmet veren araçların her birinin kapasitesi

Q_2 = İkinci aşamada hizmet veren araçların her birinin kapasitesi

H_p = p ürününün hacmi

s_i = i düğümü ziyaret edildiğinde verilmesi gereken hizmet süresi

$a_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en erken zaman

$b_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en geç zaman

$CD_i =$ uydu depo i 'nin kapasitesi

$M =$ büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

$$x_{kij} = \begin{cases} 1, & \text{1. aşamada } k \text{ aracı } i' \text{ den } j' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall v \in N_k, \forall i, j \in N_D \cup N_S) \end{cases}$$

$$y_{vlm} = \begin{cases} 1, & \text{2. aşamada } v \text{ aracı } l' \text{ den } m' \text{ ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall v \in N_v, \forall l, m \in N_S \cup N_C) \end{cases}$$

$$z_{li} = \begin{cases} 1, & \text{2. aşamada } l \text{ müşterisi uydu depo } i' \text{ den hizmet alıyorsa} \\ 0, & \text{aksi durumda } (\forall l \in N_C, \forall i \in N_S) \end{cases}$$

$w_i = i$ düğümünün ziyaret edildiği zaman $(\forall i \in N_S \cup N_C)$

$U1_{pij} =$ Birinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki dağıtılacak p ürünü adet sayısı $(\forall p \in N_p, \forall i, j \in N_D \cup N_S)$

$U2_{pij} =$ İkinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki dağıtılacak p ürünü adet sayısı $(\forall p \in N_p, \forall i, j \in N_S \cup N_C)$

$V1_{pij} =$ Birinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki toplanan p ürünü adet sayısı $(\forall p \in N_p, \forall i, j \in N_D \cup N_S)$

$V2_{pij} =$ İkinci aşamada i 'den j 'ye giderken araçtaki toplanan p ürünü adet sayısı $(\forall p \in N_p, \forall i, j \in N_S \cup N_C)$

$D1_{pj} =$ uydu depo j 'nin dağıtılan p ürünü için adet cinsinden talep miktarı $(\forall p \in N_p, \forall j \in N_S)$

$P1_{pj} =$ uydu depo j 'nin toplanan p ürünü için adet cinsinden talep miktarı $(\forall p \in N_p, \forall j \in N_S)$

MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} \sum_{j \in N_{DS}} d1_{ij} * x_{kij} + \sum_{k \in N_v} \sum_{l \in N_{SC}} \sum_{m \in N_{SC}} d2_{lm} * y_{vlm} \quad (4.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} \leq 1 \quad \forall j \in N_S \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} \leq M * \sum_{p \in N_p} D_{pi} + P_{pi} \quad \forall j \in N_S \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} - \sum_{i \in N_k} x_{kji} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall j \in N_{DS} \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_S} x_{kij} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in N_S} \sum_{j \in N_D} x_{kij} \leq 1 \quad \forall k \in N_k \quad (4.6)$$

$$x_{kij} = 0 \quad \forall k \in N_k, \forall i, j \in N_D \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in N_{DS}} U1_{pji} - \sum_{i \in N_{DS}} U1_{pij} = D1_{pj} \quad \forall p \in N_P, \forall j \in N_S \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in N_{DS}} V1_{pij} - \sum_{i \in N_{DS}} V1_{pji} = P1_{pj} \quad \forall p \in N_P, \forall j \in N_S \quad (4.9)$$

$$U1_{pij} = 0 \quad \forall p \in N_P, \forall i \in N_S, \forall j \in N_D \quad (4.10)$$

$$V1_{pij} = 0 \quad \forall p \in N_P, \forall i \in N_D, \forall j \in N_S \quad (4.11)$$

$$\sum_{p \in N_P} H_p * U1_{pij} + \sum_{i \in N_{DS}} H_p * V1_{pij} \leq Q1 * \sum_{k \in N_k} x_{kij} \quad \forall i, j \in N_{DS} \quad (4.12)$$

$$\sum_{p \in N_P} H_p * D1_{pi} + \sum_{p \in N_P} H_p * P1_{pij} \leq CD_i \quad \forall i \in N_S \quad (4.13)$$

$$D1_{pi} = \sum_{l \in N_C} z_{li} * D2_{pl} \quad \forall p \in N_P, \forall i \in N_S \quad (4.14)$$

$$P1_{pi} = \sum_{l \in N_C} z_{li} * P2_{pl} \quad \forall p \in N_P, \forall i \in N_S \quad (4.15)$$

$$\sum_{v \in N_v} \sum_{l \in N_{SC}} y_{vlm} = 1 \quad \forall m \in N_C \quad (4.16)$$

$$\sum_{l \in N_{SC}} y_{vlm} - \sum_{l \in N_{SC}} y_{vml} = 0 \quad \forall v \in N_v, \forall m \in N_{SC} \quad (4.17)$$

$$\sum_{m \in N_C} y_{vlm} \leq 1 \quad \forall v \in N_v, \forall l \in N_S \quad (4.18)$$

$$\sum_{m \in N_C} y_{vml} \leq 1 \quad \forall v \in N_v, \forall l \in N_S \quad (4.19)$$

$$\sum_{i \in N_S} z_{li} = 1 \quad \forall l \in N_C \quad (4.20)$$

$$\sum_{v \in N_v} y_{vli} \leq z_{li} \quad \forall i \in N_S, \forall l \in N_C \quad (4.21)$$

$$\sum_{v \in N_v} y_{vil} \leq z_{li} \quad \forall i \in N_s, \forall l \in N_c \quad (4.22)$$

$$y_{vlm} + z_{li} + \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq i}} z_{ms} \leq 2 \quad \begin{matrix} \forall v \in N_v, \forall l \in N_c, \\ \forall m \in N_c, l \neq m, \forall i \in N_s \end{matrix} \quad (4.23)$$

$$\sum_{i \in N_{SC}} U_{2pji} - \sum_{i \in N_{SC}} U_{2pij} = D_{2pj} \quad \forall p \in N_p, \forall j \in N_c \quad (4.24)$$

$$\sum_{i \in N_{SC}} V_{2pij} - \sum_{i \in N_{SC}} V_{2pji} = P_{2pj} \quad \forall p \in N_p, \forall j \in N_c \quad (4.25)$$

$$U_{2pij} = 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_c, \forall j \in N_s \quad (4.26)$$

$$V_{2pij} = 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_s, \forall j \in N_c \quad (4.27)$$

$$\sum_{p \in N_p} H_p * V_{2pij} + \sum_{p \in N_p} H_p * U_{2pij} \leq Q_2 * \sum_{v \in N_v} y_{vij} \quad \forall i \in N_{SC}, \forall j \in N_{SC} \quad (4.28)$$

$$w_j \leq M * \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N_{DS}} x_{kij} \quad \forall j \in N_s \quad (4.29)$$

$$w_j \geq w_i + d_{1ij} + s_i - M * (1 - x_{kij}) \quad \begin{matrix} \forall i \in N_{DS}, \forall j \in N_s, \\ \forall k \in N_k \end{matrix} \quad (4.30)$$

$$w_j \geq w_i + d_{2ij} + s_i - M * (2 - y_{vij} - \sum_{h \in N_{DS}} x_{khi}) \quad \begin{matrix} \forall i \in N_s, \forall j \in N_c, \\ \forall k \in N_k, \forall v \in N_v \end{matrix} \quad (4.31)$$

$$w_j \geq w_i + d_{2ij} + s_i - M * (1 - y_{vij}) \quad \forall i, j \in N_c, \forall v \in N_v \quad (4.32)$$

$$w_j \geq a_i \quad \forall i \in N_c \quad (4.33)$$

$$w_j \leq b_i \quad \forall i \in N_c \quad (4.34)$$

$$x_{kii} = 0 \quad \forall i \in N_{DS}, \forall k \in N_k \quad (4.35)$$

$$y_{vii} = 0 \quad \forall i \in N_{SC}, \forall v \in N_v \quad (4.36)$$

$$w_i = 0 \quad \forall i \in N_D \quad (4.37)$$

$$U_{1pij} \geq 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_{DS}, \forall j \in N_{DS} \quad (4.38)$$

$$V_{1pij} \geq 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_{DS}, \forall j \in N_{DS} \quad (4.39)$$

$$U_{2pij} \geq 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_{SC}, \forall j \in N_{SC} \quad (4.40)$$

$$V_{2pij} \geq 0 \quad \forall p \in N_p, \forall i \in N_{SC}, \forall j \in N_{SC} \quad (4.41)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (4.42)$$

5. UYGULAMALAR

Uygulamalar bölümü üç başlıktan oluşmaktadır: vaka çalışmaları, test kümeleri ve duyarlılık analizi. Uygulamalar başlığı altında yer alan problemlerin çözümünde kullanılan parametreler, Dellaert ve diğ. (2018) makalesinde kullanılan parametreler temel alınarak oluşturulmuştur. Vaka çalışmaları bölümünde önerilen karma tamsayılı matematiksel modelin kullanıldığı birbirinden farklı üç problem çözülmektedir. Test kümeleri bölümünde depo, uydu depo ve müşteri sayısındaki değişimlerin amaç fonksiyonu değerine ve problemin çözüm zamana etkileri incelenmektedir. Duyarlılık analizi bölümünde ise sistemdeki bazı parametrelerdeki değişimlerin çözüme etkileri incelenmektedir. Üç bölümde de ortak olarak kullanılan parametreler; düğümlerin iki boyutlu koordinat noktaları, müşterilerin ürünler için dağıtım ve toplama talep miktarları, düğümlerin ziyaret edilebileceği en erken ve en geç zamanlar, düğümlere verilecek servis süresi ve ürünlerin hacimleri olmak üzere ekler bölümünde (Ek A) tablolar halinde yer almaktadır. Ürün çeşitleri kullanım sırasına göre; çamaşır makinesi (ürün 1), buzdolabı (ürün 2) ve televizyon (ürün 3) olmak üzere üç çeşittir.

5.1 Vaka Çalışmaları

Bu başlık altında tez kapsamında önerilen karma tamsayılı matematiksel modelin kullanıldığı üç örnek yer almaktadır.

5.1.1 Vaka 1

Vaka 1’de; 3 ana depo, 4 uydu depo ve 15 müşteriden oluşan ve 2 çeşit ürünün hizmetinin verildiği bir ulaşım ağı ele alınmıştır.

Birinci aşamada ana depolarda ve ikinci aşamada uydu depolarda bulunan homojen araçlara dair veriler Tablo 5.1’de yer almaktadır.

Tablo 5.1: Vaka 1 araç verileri

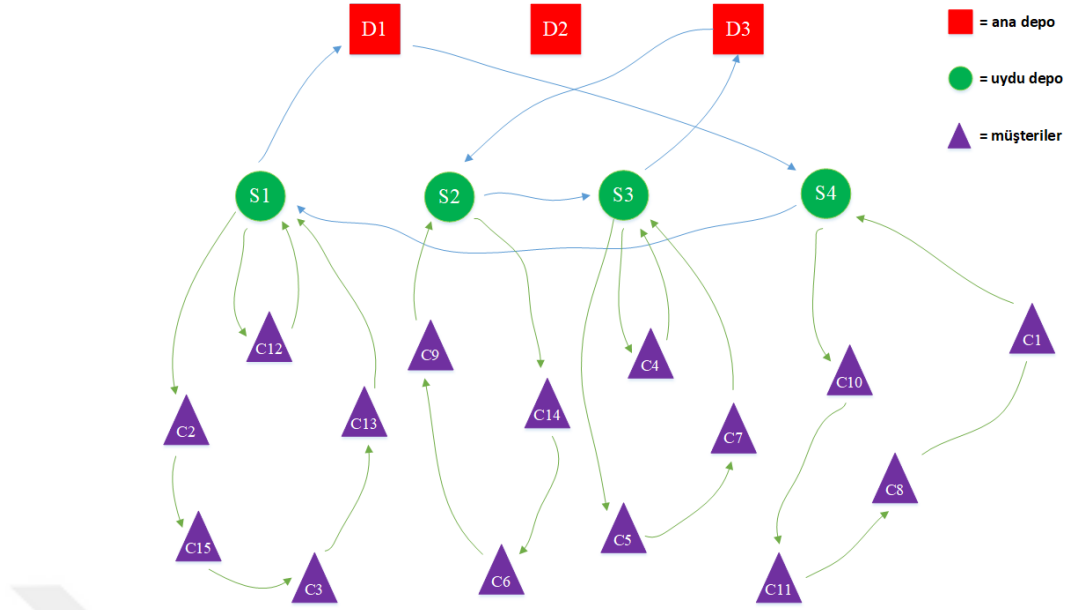
Araçlar	Adet	Kapasite (litre)
Ana Depoda Bulunan Araçlar (Birinci Aşama)	4	50.000
Uydu Depoda Bulunan Araçlar (İkinci Aşama)	8	25.000

Uydu depoların kapasiteleri, ağda yer alan müşterilerin dağıtım ve toplama ürün taleplerinin hacimlerinin toplamının 1,2 ile çarpılmasıyla elde edilen sayının uydu depolara eşit olarak paylaştırılmasıyla hesaplanmıştır ve Tablo 5.2’de yer almaktadır. Uydu depoların kapasitelerinin hesaplanmasında Belgin ve diğ. (2018) makalesinde kullanılan uydu depoların kapasiteleri belirlenirken kullanılan hesaplamaadan esinlenilmiştir.

Tablo 5.2: Vaka 1 uydu depo kapasite verileri

Uydu Depo	Kapasite (litre)
S1	40.590
S2	40.590
S3	40.590
S4	40.590

Problem 8 çekirdekli Intel(R) Core i7-6700 3.40 GHz hızında işlemciye ve 16 GB ara belleğe sahip bilgisayarda IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımı ile 155,19 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 412,423 km olarak bulunmuştur. Problemin çözümüne ait çizim aşağıda yer almaktadır. Probleminin çözümüne ait ağ gösterimi Şekil 5.1’deki gibidir.



Şekil 5.1: Vaka 1 çözümü ağ gösterimi

Problemin çözümüne bakıldığında depolar ve uydu depolardan oluşan birinci aşamada 2 aracın kullanıldığı görülmektedir ve oluşan rotalar Tablo 5.3'te yer almaktadır.

Tablo 5.3: Vaka 1 birinci aşamadaki rota oluşumu

Birinci Aşama					
Araçlar	Rota				Rota Uzunluğu (km)
Araç 1	D3	S2	S3	D3	64,40
Araç 2	D1	S4	S1	D1	102,28
Toplam					166,68

Tablo 5.4, uydu depoların çözüm sonucu oluşan adet cinsinden ürün dağıtım ve toplama taleplerini göstermektedir.

Tablo 5.4: Vaka 1 uydu depoların ürün talepleri

Uydu Depo	Çamaşır Makinesi (Ürün 1)		Buzdolabı (Ürün 2)	
	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi
S1	24	24	16	28
S2	17	18	18	21
S3	13	14	15	13
S4	17	24	22	17

Tablo 5.5, uydu depo ve müşterilerden oluşan ikinci aşamada uydu depoların hizmet verdiği müşterileri göstermektedir.

Tablo 5.5: Vaka 1 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler

Uydu depo	Müşteriler
S1	C1-C2-C3-C12-C15
S2	C6-C9-C14
S3	C4-C5-C7
S4	C8-C10-C11-C13

İkinci aşamada 6 araç kullanılmıştır. İkinci aşamadaki oluşan rotalar Tablo 5.6’da yer almaktadır.

Tablo 5.6: Vaka 1 ikinci aşamadaki rota oluşumu

İkinci Aşama							
Araçlar	Rota					Rota Uzunluğu (km)	
Araç 1	S1	C2	C15	C3	C13	S1	73,64
Araç 3	S2	C14	C6	C9	S2		44,83
Araç 4	S4	C10	C11	C8	C1	S4	82,80
Araç 5	S1	C12	S1				8,94
Araç 6	S3	C5	C7	S3			28,31
Araç 7	S3	C4	S3				7,21
Toplam							245,74

Düğümelerin ziyaret edildiği zamanlar Tablo 5.7’de yer almaktadır.

Tablo 5.7: Vaka 1 ağda yer alan düğümelerin ziyaret zamanı

Düğümeler	Ziyaret Zamanı (dk)
D1	0,00
D2	0,00
D3	0,00
S1	17,89
S2	17,00
S3	107,75
S4	68,59
C1	349,23
C2	127,37
C3	191,81
C4	244,19
C5	226,00
C6	163,00
C7	282,00
C8	245,00
C9	342,51
C10	187,00
C11	220,96
C12	327,00
C13	370,00
C14	75,68
C15	159,00

5.1.2 Vaka 2

Vaka 2’de; 2 ana depo, 3 uydu depo ve 15 müşteriden oluşan ve 3 çeşit ürünün hizmetinin verildiği bir ulaşım ağı ele alınmıştır.

Birinci aşamada ana depolarda ve ikinci aşamada uydu depolarda bulunan homojen araçlara dair veriler Tablo 5.8’de yer almaktadır.

Tablo 5.8: Vaka 2 araç verileri

Araçlar	Adet	Kapasite (litre)
Ana Depoda Bulunan Araçlar (Birinci Aşama)	3	50.000
Uydu Depoda Bulunan Araçlar (İkinci Aşama)	6	25.000

Uydu depoların kapasiteleri Tablo 5.9’da yer almaktadır.

Tablo 5.9: Vaka 2 uydu depo kapasite verileri

Uydu Depo	Kapasite (litre)
S1	66.840
S2	66.840
S3	66.840

Problem 8 çekirdekli Intel(R) Core i7-6700 3.40 GHz hızında işlemciye ve 16 GB ara belleğe sahip bilgisayarda IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımı ile 3,81 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 403,528 km olarak bulunmuştur. Problemin çözümüne ait çizim aşağıda yer almaktadır. Probleminin çözümüne ait ağ gösterimi Şekil 5.2’deki gibidir.

Tablo 5.12: Vaka 2 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler

Uydu depo	Müşteriler
S1	C1-C2-C12-C13-C15
S2	C5-C6-C9-C14
S3	C3-C4-C7-C8-C10-C11

İkinci aşamada 6 araç kullanılmıştır. İkinci aşamadaki oluşan rotalar Tablo 5.13'te yer almaktadır.

Tablo 5.13: Vaka 2 ikinci aşamadaki rota oluşumu

İkinci Aşama						
Araçlar	Rota					Rota Uzunluğu (km)
Araç 1	S2	C14	C6	C9	S2	44,83
Araç 2	S3	C10	C4	S3		45,63
Araç 3	S3	C3	C11	C8	C7 S3	63,00
Araç 4	S2	C5	S2			22,63
Araç 5	S1	C15	C1	C13	S1	42,57
Araç 6	S1	C2	C12	S1		32,61
Toplam						251,27

Düğümelerin ziyaret edildiği zamanlar Tablo 5.14'te yer almaktadır.

Tablo 5.14: Vaka 2 ağda yer alan düğümelerin ziyaret zamanı

Düğümeler	Ziyaret Zamanı (dk)
D1	0,00
D2	0,00
S1	17,89
S2	17,72
S3	40,52
C1	349,23
C2	131,00
C3	191,81
C4	254,00
C5	246,00
C6	163,00
C7	282,00
C8	245,00
C9	342,51
C10	207,00
C11	220,96
C12	327,00
C13	370,00
C14	92,00
C15	159,00

5.1.3 Vaka 3

Vaka 1’de; 3 ana depo, 4 uydu depo ve 15 müşteriden oluşan ve 2 çeşit ürünün hizmetinin verildiği bir ulaşım ağı ele alınmıştır.

Birinci aşamada ana depolarda ve ikinci aşamada uydu depolarda bulunan homojen araçlara dair veriler Tablo 5.15’te yer almaktadır. Vaka 3’te ilk aşamadaki araçların kapasite birbirine eşit olmakla birlikte bir aracın kapasitesi ağdaki bütün uydu depoların taleplerini tek başına karşılayacak boyuttur.

Tablo 5.15: Vaka 3 araç verileri

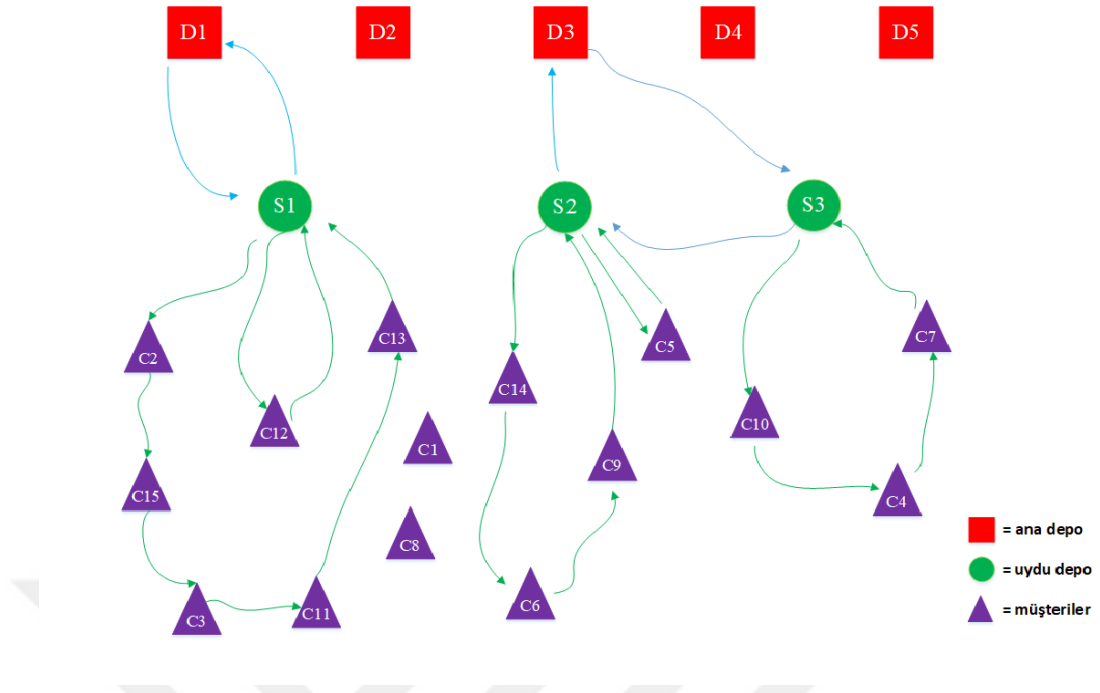
Araçlar	Adet	Kapasite (litre)
Ana Depoda Bulunan Araçlar (Birinci Aşama)	3	200.000
Uydu Depoda Bulunan Araçlar (İkinci Aşama)	6	100.000

Vaka 3’te her bir uydu deponun kapasitesi birbirine eşit olmakla birlikte her bir uydu deponun kapasitesi ağda yer alan bütün müşterilerin talebini karşılayacak boyuttur. Uydu depoların kapasiteleri Tablo 5.16’da yer almaktadır.

Tablo 5.16: Vaka 3 uydu depo kapasite verileri

Uydu Depo	Kapasite (litre)
S1	162.360
S2	162.360
S3	162.360

Problem 8 çekirdekli Intel(R) Core i7-6700 3.40 GHz hızında işlemciye ve 16 GB ara belleğe sahip bilgisayarda IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımı ile 10,81 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 320,74 km olarak bulunmuştur. Problemin çözümüne ait ağ gösterimi Şekil 5.3’te yer almaktadır.



Şekil 5.3: Vaka 3 çözümü ağ gösterimi

Problemin çözümüne bakıldığında depolar ve uydu depolardan oluşan birinci aşamada 2 aracın kullanıldığı görülmektedir ve oluşan rotalar Tablo 5.17’de yer almaktadır.

Tablo 5.17: Vaka 3 birinci aşamadaki rota oluşumu

Birinci Aşama					
Araçlar	Rota			Rota Uzunluğu (km)	
Araç 1	D1	S1	D1	35,78	
Araç 2	D3	S3	S2	D3	64,40
Toplam				100,18	

Uydu depoların kapasiteleri Tablo 5.18’de gösterilmektedir.

Tablo 5.18: Vaka 2 uydu depoların ürün talepleri

Uydu Depo	Çamaşır Makinesi (Ürün 1)		Buzdolabı (Ürün 2)	
	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi
S1	40	38	35	38
S2	20	21	25	27
S3	11	21	11	14

Tablo 5.19, uydu depo ve müşterilerden oluşan ikinci aşamada uydu depoların hizmet verdiği müşterileri göstermektedir.

Tablo 5.19: Vaka 3 uydu depoların hizmet verdiği müşteriler

Uydu depo	Müşteriler
S1	C1-C2-C3-C8-C11-C12-C15
S2	C5-C6-C9-C14
S3	C4-C7-C10

İkinci aşamada 5 araç kullanılmıştır. İkinci aşamadaki oluşan rotalar Tablo 5.20’de yer almaktadır.

Tablo 5.20: Vaka 3 ikinci aşamadaki rota oluşumu

İkinci Aşama										
Araçlar	Rota									Rota Uzunluğu (km)
Araç 2	S2	C5	S2							22,63
Araç 3	S1	C12	S1							8,94
Araç 4	S2	C14	C6	C9	S2					44,83
Araç 5	S3	C10	C4	C7	S3					49,02
Araç 6	S1	C2	C15	C3	C11	C8	C1	C13	S1	95,14
Toplam										220,56

Düğümelerin ziyaret edildiği zamanlar Tablo 5.21’de yer almaktadır.

Tablo 5.21: Vaka 3 ağda yer alan düğümelerin ziyaret zamanı

Düğüm	Ziyaret Zamanı (dk)
D1	0,00
D2	0,00
D3	0,00
D4	0,00
D5	0,00
S1	17,89
S2	57,40
S3	24,60
C1	349,23
C2	111,00
C3	207,00
C4	254,00
C5	226,00
C6	163,00
C7	282,00
C8	245,00
C9	342,51
C10	207,00
C11	220,16
C12	327,00
C13	370,00
C14	92,00
C15	159,00

Ele alınan 3 vaka çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.22’de yer almaktadır.

Tablo 5.22: Üç vakaya ait sonuçlar

Vakalar	Birinci aşamada kullanılan araç sayısı	Birinci aşamada katedilen mesafe (km)	İkinci aşamada kullanılan araç sayısı	İkinci aşamada katedilen mesafe (km)	Amaç değeri (km)
Vaka 1	2	166,683	6	254,740	245,740
Vaka 2	3	152,260	6	251,268	403,528
Vaka 3	2	100,177	5	220,563	320,740

5.2 Test Problemleri

Bu bölümde 2 ve 3 üründen oluşan depo ve uydu depo sayıları 2, 3, 4 olan 15, 20, 25 ve 30 müşteriden oluşan tez kapsamında ele alınan problem önerilen matematiksel model ile çözülmektedir. Toplam 120 alt problem, 8 çekirdekli Intel(R) Core i7-6700 3.40 GHz hızında işlemciye ve 16 GB ara belleğe sahip bilgisayarda IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımında çözülmüştür.

2 ürün ve 15 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.23'te yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 50.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 25.000 litredir.

Tablo 5.23: 2 ürünlü 15 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 2 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 15 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
1	2	2	15	340,451	1,05
2	2	3	15	357,275	3,50
3	2	4	15	420,233	59,86
4	3	2	15	339,011	0,77
5	3	3	15	340,63	5,13
6	3	4	15	412,423	153,58
7	4	2	15	39,011	1,33
8	4	3	15	340,630	11,17
9	4	4	15	398,039	69,78
10	5	2	15	339,011	0,75
11	5	3	15	340,630	8,94
12	5	4	15	370,083	64,61
13	6	2	15	339,011	1,58
14	6	3	15	340,630	6,55
15	6	4	15	370,083	102,64

2 ürün ve 20 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.24'te yer

almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 50.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 25.000 litredir.

Tablo 5.24: 2 ürünlü 20 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 2 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 20 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
16	2	2	20	394,053	7,73
17	2	3	20	431,862	11,83
18	2	4	20	470,743	242,53
19	3	2	20	392,613	3,81
20	3	3	20	398,572	91,69
21	3	4	20	454,098	671,44
22	4	2	20	392,613	10,64
23	4	3	20	394,501	138,58
24	4	4	20	404,224	672,77
25	5	2	20	392,613	5,63
26	5	3	20	394,501	152,98
27	5	4	20	404,224	135,06
28	6	2	20	392,613	6,28
29	6	3	20	394,501	150,53
30	6	4	20	404,224	164,51

2 ürün ve 25 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.25'te yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 100.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 50.000 litredir.

Tablo 5.25: 2 ürünli 25 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 2 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 25 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
31	2	2	25	475,055	2,55
32	2	3	25	483,273	185,86
33	2	4	25	520,234	596,08
34	3	2	25	473,615	3,33
35	3	3	25	466,628	225,09
36	3	4	25	503,589	341,03
37	4	2	25	473,615	2,36
38	4	3	25	466,628	141,28
39	4	4	25	501,233	338,61
40	5	2	25	473,615	6,38
41	5	3	25	466,628	217,77
42	5	4	25	473,278	254,53
43	6	2	25	473,615	7,66
44	6	3	25	466,628	38,03
45	6	4	25	473,278	217,73

2 ürün ve 30 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.26'da yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 100.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 50.000 litredir.

Tablo 5.26: 2 ürünli 30 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 2 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 25 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
46	2	2	30	475,055	20,30
47	2	3	30	483,273	258,11
48	2	4	30	520,234	5864,91
49	3	2	30	473,615	6,80
50	3	3	30	466,628	95,53
51	3	4	30	503,589	5584,42
52	4	2	30	473,615	31,09
53	4	3	30	466,628	341,48
54	4	4	30	501,233	1465,86
55	5	2	30	473,615	23,44
56	5	3	30	466,628	475,11
57	5	4	30	473,278	1577,31
58	6	2	30	473,615	38,34
59	6	3	30	466,628	633,63
60	6	4	30	473,278	2448,89

3 ürün ve 15 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.27'de yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur.

Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 75.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 37.500 litredir.

Tablo 5.27: 3 ürünlü 15 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 3 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 15 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
61	2	2	15	339,691	0,88
62	2	3	15	357,275	3,56
63	2	4	15	406,990	75,92
64	3	2	15	338,251	0,98
65	3	3	15	340,630	6,69
66	3	4	15	393,871	82,91
67	4	2	15	338,251	0,97
68	4	3	15	340,630	6,20
69	4	4	15	393,871	180,22
70	5	2	15	338,251	1,20
71	5	3	15	340,630	7,25
72	5	4	15	370,092	83,95
73	6	2	15	338,251	1,00
74	6	3	15	340,630	11,92
75	6	4	15	370,092	75,00

3 ürün ve 20 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.28'de yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 75.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 37.500 litredir.

Tablo 5.28: 3 ürünlü 20 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 3 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 20 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
76	2	2	20	383,036	3,03
77	2	3	20	386,453	7,20
78	2	4	20	466,108	220,38
79	3	2	20	381,595	2,86
80	3	3	20	369,808	14,20
81	3	4	20	449,463	336,33
82	4	2	20	381,595	3,94
83	4	3	20	369,808	7,55
84	4	4	20	435,079	637,89
85	5	2	20	381,595	3,48
86	5	3	20	369,808	23,83
87	5	4	20	407,124	568,34
88	6	2	20	381,595	5,16
89	6	3	20	369,808	35,76
90	6	4	20	407,124	620,66

3 ürün ve 25 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.29’da yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 150.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 75.000 litredir.

Tablo 5.29: 3 ürünlü 25 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 3 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 25 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
91	2	2	25	435,285	3,52
92	2	3	25	455,299	325,33
93	2	4	25	468,430	862,33
94	3	2	25	433,845	3,52
95	3	3	25	438,654	184,05
96	3	4	25	451,785	421,31
97	4	2	25	433,845	3,84
98	4	3	25	438,654	187,02
99	4	4	25	451,785	520,09
100	5	2	25	433,845	4,23
101	5	3	25	438,654	243,78
102	5	4	25	428,007	370,11
103	6	2	25	433,845	3,69
104	6	3	25	438,654	264,08
105	6	4	25	428,007	187,31

3 ürün ve 30 müşteriden ve farklı sayıdaki depo ve ara depolardan oluşan alt problemlere ait amaç değerleri ve çözüm süreleri (saniye) Tablo 5.30’da yer almaktadır. Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur.

Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_1) 150.000 litre iken, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesi (Q_2) 75.000 litredir.

Tablo 5.30: 3 ürünlü 30 müşterili alt problem seti

Ürün Sayısı (n_p) = 3 ve Müşteri Sayısı (n_c) = 30 için Problem Çözümleri					
Problem No (#)	Depo Sayısı (n_d)	Uydu Depo Sayısı (n_s)	Müşteri Sayısı (n_c)	Amaç Değeri (Z)	Çözüm Süresi (saniye)
106	2	2	30	475,055	29,33
107	2	3	30	486,320	714,41
108	2	4	30	516,206	3314,17
109	3	2	30	473,615	11,56
110	3	3	30	469,675	747,45
111	3	4	30	499,562	1735,45
112	4	2	30	473,615	25,47
113	4	3	30	469,675	2146,38
114	4	4	30	499,562	2446,69
115	5	2	30	473,615	35,56
116	5	3	30	469,675	1845,11
117	5	4	30	474,075	2953,59
118	6	2	30	473,615	14,80
119	6	3	30	469,675	1950,03
120	6	4	30	474,075	2807,34

Birinci aşamada 4 araç (n_k), ikinci aşamada ise 8 araç (n_v) mevcuttur. Birinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesinin (Q_1) 400.000 litre, ikinci aşamadaki araçların her birinin kapasitesinin (Q_2) 200.000 litre kabul edildiği, 2 ürün ve 45 müşteriden oluşan 2 ve 3 uydu depolu alt problemlerde 24 saatin altında bir sürede optimum çözüme ulaşılırken, 4 uydu depolu alt problemlerde model 24 saat çalıştırıldığında optimum çözüme ulaşamamıştır.

5.3 Duyarlılık Analizi

Bu bölümde, problemde bazı parametrelerin değişiminin problemin amaç değerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu parametreler başlıca; birinci aşamadaki araç sayısı, ikinci aşamadaki araç sayısı, ana depo sayısı ve uydu depo sayısıdır.

5.3.1 Birinci Aşamadaki Araç Sayısı ve Araç Kapasitesi Değişimi Etkisi

İkinci aşamadaki araç sayısı, araç kapasitesi ve diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla birinci aşamadaki toplam araç sayısının ve araçların kapasitesindeki değişimin amaç değeri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. 2 ürün, 6 ana depo, 4 uydu

depo ve 15 müşteriden oluşan bir taşıma ağına uydu depolara hizmet verebilmesi için en az 1 araç, her uydu deponun farklı bir araç ile ziyaret edildiği durum düşünüldüğünde ise en fazla 5 araç gereklidir. Bu sebeple birinci aşamada 1 araç ile 5 araç arasındaki değişimin etkileri incelenmiştir. Sistemde 5 uydu depo bulunmakta ve her birinin kapasitesi 150.000 litredir. İkinci aşamadaki araç sayısı 10 ve bu araçların her birinin kapasitesi 25.000 litredir. Bu bilgiler ışığında elde edilen sonuçlar Tablo 5.31’de yer almaktadır.

Tablo 5.31: Birinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi değişiminin etkisi

Birinci aşamadaki araç kapasiteleri (litre) (Q_1)	Birinci aşama araç sayısı (n_k)				
	1	2	3	4	5
15.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	487,308
20.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	382,447	382,447
25.000	Çözüm yok	Çözüm yok	361,647	361,647	361,647
30.000	Çözüm yok	Çözüm yok	335,567	335,567	335,567
40.000	Çözüm yok	325,859	325,859	325,859	325,859
50.000	Çözüm yok	325,265	325,265	325,265	325,265
60.000	Çözüm yok	325,265	325,265	325,265	325,265
75.000	350,041	325,265	325,265	325,265	325,265

Tabloya z’ye bakıldığında birinci aşamada araçların kapasiteleri; 1 araç ile hizmet verilmesi durumunda en az 75.000 litre, 2 araç ile hizmet verilmesi durumunda 40.000 litre, 3 araç ile hizmet verilmesi durumunda 25.000 litre, 4 araç ile hizmet verilmesi durumunda en az 20.000 litre, 5 araç ile hizmet verilmesi durumunda en az 15.000 litre olması gerektiği görülmektedir. Birinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi arttıkça sistemde araçlar tarafından katedilen toplam mesafenin azaldığı yani amaç değerinin daha iyiye gittiği görülmektedir. Fakat belirli bir artıştan sonra amaç değeri, araç sayısı ve araç kapasitesi artışından etkilenmemekte olup sabit kalmaktadır. Tablo z’de yer alan sonuçlar arasında amaç değerinin en iyi olduğu, en ekonomik seçenek birinci aşamada 40.000 litre kapasiteye sahip 2 aracın kullanılmasıdır.

5.3.2 İkinci Aşamadaki Araç Sayısı ve Araç Kapasitesi Değişimi Etkisi

Birinci aşamada yer alan araç sayısı, araç kapasiteleri ve sistemdeki diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla ikinci aşamadaki toplam araç sayısı ve kapasitesindeki değişimin amaç değeri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. 2 ürün, 6 ana

depo, 5 uydu depo ve 15 müşteriden oluşan bir taşıma ağında ikinci aşamada müşterilere hizmet verilirken kullanılan araç sayısının 1'den 10'a kadar olan değişiminin etkisi incelenmiştir. Birinci aşamadaki araç sayısı 5 ve her bir aracın kapasitesi 150.000 litredir. Sistemde 5 uydu depo yer almakta olup kapasiteleri 150.000 litredir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.32'de yer almaktadır.

Tablo 5.32: İkinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi değişiminin etkisi

İkinci aşamadaki araç kapasitesi (litre) (Q2)	İkinci aşamadaki araç sayısı (n _v)				
	1	2	3	4	5
9.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok
10.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok
15.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok
20.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	378,030	341,496
25.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	328,981	325,265
30.000	Çözüm yok	Çözüm yok	342,138	328,981	318,561
35.000	Çözüm yok	Çözüm yok	339,058	330,241	314,265
40.000	Çözüm yok	Çözüm yok	338,043	329,760	314,265
50.000	Çözüm yok	Çözüm yok	338,043	329,760	314,265

Tablo 5.32: İkinci aşamada araç sayısı ve araç kapasitesi değişiminin etkisi (devam)

İkinci aşamadaki araç kapasitesi (litre) (Q2)	İkinci aşamadaki araç sayısı (n _v)				
	6	7	8	9	10
9.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok
10.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	469,399	422,967
15.000	361,465	359,379	359,379	359,379	359,379
20.000	340,542	340,542	340,542	340,542	340,542
25.000	325,265	325,265	325,265	325,265	325,265
30.000	318,561	318,561	318,561	318,561	318,561
35.000	314,265	314,265	314,265	314,265	314,265
40.000	314,265	314,265	314,265	314,265	314,265
50.000	314,265	314,265	314,265	314,265	314,265

Tablo y'de yer alan sonuçlara bakıldığında sistemin çalışabilmesi için belirli bir kapasitede en az 3 aracın ikinci aşamada hizmet veriyor olması gerekmektedir. İkinci aşamada kapasitesi ne kadar büyük olursa olsun, 1 veya 2 araç ile hizmet verilmesi mümkün değildir. Bunun sebebi müşterilerin ziyaret edilmesi gereken zaman penceresi kısıtının sağlanabilmesi için sistemin ikinci aşamada en az 3 araca gereksinim duymasıdır. 3 araçtan her birinin kapasitesi en az 30.000 litre olmalıdır.

Sistemin çalışabilmesi için ikinci aşamada yer alan araçların kapasitelerinin; 4 ve 5 araç kullanılması durumunda en az 20.000 litre, 6, 7 ve 8 araç kullanılması durumunda en az 15.000 litre, 9 ve 10 araç kullanılması durumunda en az 10.000 litre

olması gerekmektedir. İkinci aşamadaki araç sayısı ve araç kapasiteleri arttıkça amaç değeri belli bir noktaya kadar iyileşme göstermekte olup sonrasında sabit kalmaktadır.

Tablo y’de yer alan sonuçlar arasında en iyi sonucu veren en ekonomik seçenek 35.000 litre kapasiteye sahip 5 aracın ikinci aşamada kullanılmasıdır.

5.3.3 Ana Depo Sayısındaki Değişim Etkisi

Diğer bütün parametreler sabit kalmak koşuluyla 2 ürün, 4 uydu depo ve 15 müşteriden oluşan taşıma ağında ana depo sayısındaki değişimin amaç değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birinci ve ikinci aşamadaki araç sayısı sırasıyla 4 ve 8’dir. Birinci ve ikinci aşamadaki araçların kapasiteleri sırasıyla 50.000 litre ve 25.000 litredir. Uydu depoların her birinin kapasitesi 40.590 litredir.

Tablo 5.33: Ana depo sayısındaki değişimin etkisi

Depo Sayısı (n_d)	Birinci aşamada katedilen mesafe (km)	İkinci aşamada katedilen mesafe (km)	Amaç Değeri (Z)
1	184,384	258,993	443,377
2	161,241	258,993	420,233
3	166,683	245,740	412,423
4	152,299	245,740	398,039
5	124,343	245,740	370,083
6	124,343	245,740	370,083

Ana depo değişimi sonucu birinci aşamada ve ikinci aşamada araçların katetmiş olduğu mesafe ve amaç değeri Tablo 5.33’te yer almaktadır. Ana depo sayısı 2’den 3’e çıkarıldığında birinci aşamada katedilen mesafe bir miktar artış gösterse de ikinci aşamada katedilen mesafe kısalmıştır ve amaç değerinde iyileşme sağlanmıştır. 1 ve 2 ana depo kullanıldığında ikinci aşamada katedilen mesafe aynı iken 3 ana depo kullanıldığında ikinci aşamada katedilen mesafe azalmıştır. 3 ana depodan sonraki artışlar ikinci aşamada katedilen mesafeyi değiştirmemiştir. Fakat 3 ana depodan sonraki artışlar birinci aşamada katedilen mesafenin azalmasını sağladığı için amaç değerinde iyileşme sağlamıştır. Sistemdeki ana depo sayısı 5’ten 6’ya çıkarıldığında çözümde bir değişiklik olmamaya başlamıştır, sistem ana depo artışına duyarsız hale gelmeye başlamıştır. Fakat bunun sebebi ilave edilen 6.ana deponun konumunun cazip olmaması veya sistemin doygunluğa ulaşmış olmasındandır. Konumu daha cazip bir ana depo eklendiği sürece sistemin amaç değerinde belirli bir noktaya kadar iyileşme

sağlanması mümkündür. Buradan yapılabilecek çıkarım şudur: sistemde diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla ana depo sayısındaki artış amaç değerini asla daha da kötüleştirmeyecektir.

5.3.4 Uydu Depo Sayısındaki Değişim Etkisi

2 ürün, 6 ana depo ve 15 müşteriden oluşan taşıma ağında uydu depo sayısındaki ve kapasitesindeki değişimin amaç değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birinci ve ikinci aşamadaki araç sayısı sırasıyla 4 ve 8’dir. Birinci ve ikinci aşamadaki araçların kapasiteleri sırasıyla 100.000 litre ve 200.000 litredir. Müşteri talepleri ve diğer parametreler sabit olmak üzere ortaya çıkan sonuçlar Tablo 5.34’te verilmiştir.

Tablo 5.34: Uydu depo sayısındaki değişimin etkisi

Uydu depo kapasitesi (CD _i)	Uydu depo sayısı (n _s)				
	1	2	3	4	5
25.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok
30.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	384,725
40.000	Çözüm yok	Çözüm yok	Çözüm yok	372,587	338,349
50.000	Çözüm yok	Çözüm yok	345,618	345,618	326,267
75.000	Çözüm yok	327,871	320,740	320,740	314,265
100.000	Çözüm yok	327,871	320,740	320,740	314,265
125.000	Çözüm yok	327,871	320,740	320,740	314,265
150.000	351,953	327,871	320,740	320,740	314,265

Sistemin çalışabilmesi için uydu depoların kapasiteleri; 1 uydu depo kullanılması durumunda en az 150.000 litre, 2 uydu depo kullanılması durumunda en az 75.000 litre, 3 uydu depo kullanılması durumunda en az 50.000 litre, 4 uydu depo kullanılması durumunda en az 40.000 litre, 5 uydu depo kullanılması durumunda en az 30.000 litre olmalıdır. Uydu depo sayısındaki veya uydu depo kapasitesindeki artış sistem içindeki araçların katettiği toplam mesafeyi azaltmakta veya değiştirmemektedir. Tablo x’e bakıldığında sonuçlar arasında 75.000 litre kapasiteye sahip 5 uydu depodan oluşan sistem tasarlamak firmadaki araçların katedeceği mesafenin en küçük olmasını sağlayacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda dünyadaki bazı şehirlerde dizel araçların şehir merkezine girişinin yasaklanması üzerine firmaların ürün ve hizmetlerini şehir merkezinde yer alan müşterilerine ulaştırması hususunda firmaların kaygıları ortaya çıkmıştır. Bu soruna çözüm olarak kullanılmak üzere şehir lojistiğinde iki aşamalı bir lojistik ağ modeli tasarımı önerilmiştir ve bu tasarım matematiksel model ile ifade edilmiştir. Bu tez kapsamında önerilen matematiksel model 2A_ ARP, EZTD_ ARP, ZP_ ARP, ÇD_ ARP ve ÇÜ_ ARP'nin birlikte ele alındığı 2E_Z_ ARP olarak adlandırılmıştır. Tez kapsamında ele alınan problem beş ARP türünü de bir arada dikkate alan literatürdeki tek çalışmadır. Literatürde 2A_ ARP'ye dair çalışmalara bakıldığında uydu deponun ziyaret edilmediği durum dikkate alınmamıştır. Halbuki her bir uydu deponun kapasitesi, sistemde yer alan müşterinin ihtiyacını tek başına karşılayacak şekilde tasarlanırsa bazı uydu depoların kullanılmadığı, yani sistemdeki her bir uydu deponun ziyaret edilmesinin zorunlu olmadığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum tez kapsamında önerilen matematiksel modelde dikkate alınmıştır.

Tez kapsamında önerilen matematikselin doğruluğunu test etmek amacıyla Polat ve diğ. (2015) ve Dellaert ve diğ. (2018) makalelerinde yer alan problemler çözülmüş olup aynı optimum sonuçlara ulaşılmıştır. Dellaert ve diğ. (2018) çalışmasında kullanılan veri seti temel alınarak bu tez kapsamında alt problemler oluşturulmuştur. Bu alt problemler 8 çekirdekli Intel(R) Core i7-6700 3.40 GHz hızında işlemciye ve 16 GB ara belleğe sahip bilgisayarda IBM Cplex Optimization Studio 12.8.0 yazılımı ile çözülmeye çalışılmış ve 24 saatin altında başarılı optimum sonuçlar üretmiştir. Başarılı sonuçlar üretilen 120 alt problem test problemleri bölümünde detaylı olarak paylaşılmıştır. Matematiksel modelin çözüm yeteneğini test edebilmek adına daha fazla müşterilerden oluşan problemler üzerinde de testler yapılmaya devam edilmiş olup, 2 ürün, 6 ana depo, 3 uydu depo ve 45 müşteriye kadar olan problemlerde 24 saatin altında başarılı şekilde optimum çözümlere ulaşılmıştır. Böylece tez kapsamında önerilen matematiksel model ile küçük çaplı birçok problemde 1 gün içinde en iyi çözümler üretilebilmekte ve firmalarda taktiksel düzeyde kararların alınabilmesine olanak sağlamaktadır.

Duyarlılık analizi bölümünde birinci ve ikinci aşamadaki araç sayısının ve bu araçların kapasitelerindeki değişimlerin, ana depo ve uydu depo sayısındaki değişimlerin problemin amaç değerini ne yönde etkilediği ele alınmıştır. Sistemin çalışabilmesi adına en az kaç araca ve uydu depoya ihtiyaç olduğu, araçlara ve uydu depoların kapasitelerinin en az kaç litre olması gerektiği sorularına cevaplar bulunmuştur.

Bu tez kapsamında yapılan çalışma sonucunda şehir merkezine dizel araçların girişinin kısıtlanması üzerine lojistik maliyetlerinin artacağı yönünde kaygıları olan firmaların şehir merkezinde yer alan müşterilerine ürün ve hizmet ulaştırabilmesine ve bunu yaparken de kaynaklarını en ekonomik şekilde kullanarak lojistik maliyetlerini düşürebilmesine imkan sağlamaktadır.

Tez kapsamında ele önerilen matematiksel model gerçek hayata dair birçok kısıtı içinde barındırmakla beraber önemli sayıda alt problemlere makul sürede en iyi çözümler üretebilmekte olup kentsel lojistik alanında çalışma yapacak araştırmacılara uygun bir zemin oluşturacaktır.

7. KAYNAKLAR

Ahmadizar, F., Zeynivand, M., & Arkat, J., “Two-level vehicle routing with cross-docking in a three-echelon supply chain: A genetic algorithm approach”, *Applied Mathematical Modelling*, 39 (22), 7065-7081, (2015).

Aladağ, Ç., H., *Tamsayılı Programlamaya Giriş*, Bursa: Ekin Basım Yayın Dağıtım, 56-57, (2010).

Allahyari, S., Salari, M., & Vigo, D., “A hybrid metaheuristic algorithm for the multidepot covering tour vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 242 (3), 756–768, <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.048>, (2015).

Archetti, C., Bianchessi, N., & Speranza, M. G., “A branch-price-and-cut algorithm for the commodity constrained split delivery vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, 64, 1-10, (2015).

Atasagun, G., C., “Zaman Bağımlı Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2015).

Baldacci, R., Mingozzi, A., Roberti, R., & Calvo, R. W., “An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem”, *Operations Research*, 61(2), 298-314, (2013).

Baldacci R., Zhou L., Vigo D., Wang X., “A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution”, *Eur. J. Oper. Res.*, 265 (2), 765-778, (2018).

Belgin O., Karaoglan I., Altıparmak F., “Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: mathematical model and heuristic approach”, *Comput. Ind. Eng.*, 115, 1-16, (2018).

Billaut J.C., Kergosien Y., Lenté C., Perrin S., “Metaheuristic algorithms for solving two interconnected vehicle routing problems in a hospital complex”, *Computers & Operations Research*, 40 (10), 2508-2518, (2013).

Boffey, D., “Amsterdam to ban petrol and diesel cars and motorbikes by 2030[online]”, (3Aralık 2019), <https://www.theguardian.com/world/2019/may/03/amsterdam-ban-petrol-diesel-cars-bikes-2030>, (2019).

Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., Vidal, T., “A large neighborhood based heuristic for two-echelon routing problems”, *Computers & Operations Research*, 76, 208-225, (2016).

Breunig, U., Baldacci R., Hartl R. F., Vidal T., “The electric two-echelon vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, 103, 198-210, (2019).

Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & Vigo, D., “An iterated local search for the multicommodity multi-trip vehicle routing problem with time windows” *Computers & Operations Research*, 51, 257–267, <http://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.006>, (2014).

Cerdá J., Dondo R., Méndez C.A., “The multi-echelon vehicle routing problem with cross docking in supply chain management”, *Computers and Chemical Engineering*, 35 (12), 3002-3024, (2011).

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., “*Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem*”, Montreal: CIRRELT, (2008^a).

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., “Lower bounds for the two-echelon vehicle routing problem”, Proceedings of the 9th EU/Meeting on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing, Troyes, France, (2008^b).

Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G., “Models for evaluating and planning city logistics systems”, *Transportation Science*, 43(4), 432-454, (2009).

Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., & Tadei, R., “Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2 (3), 5944-5955, (2010).

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., “Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem”, In: European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Berlin, Heidelberg: Springer, 179-190, (2011).

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., “Impact of generalized travel costs on satellite location in the two-echelon vehicle routing problem”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 195-204, (2012).

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., “GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem”, *In Advances in Metaheuristics*, 113-125, (2013).

Çetinkaya, C., Özceylan, E., Demirel, N., Uslu, A., *Lojistik Bilgi Sistemleri ve Teknolojileri*, İstanbul: İdeal Kültür Yayıncılık, 31-34, (2017).

Dantzig, G. B., Ramser, H., “The Truck Dispatching Problem”, *Management Science*, 6 (1), 80-91, (1959).

Dellaert, M., Saridarq, F. D., Woensel, T. V., & Crainic, T. G. “Branch-and-price-based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows”, *Transportation Science*, 53 (3), 5944-5955, (2018).

Eitzen, H., Lopez-Pires, F., Baran, B., Sandoya, F., & Chicaiza, J. L., “A multi-objective two-echelon vehicle routing problem. An urban goods movement approach for smart city logistics”, *XLIII Latin American Computer Conference (CLEI)*, Argentina, Cordoba, 1–10, (2017).

Feliu, J.G., Perboli, G., Tadei, R., Daniele, V., “The two-echelon capacitated vehicle routing problem”, *In: Technical report DEIS OR.INGCE 2007/2(R)*, Department of Electronics, Computer Science and Systems, University of Bologna, Bologna, Italy, (2007).

Grangier, P., Gendreau, M., Lehoued, F., & Rousseau, L. M., “An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization”, *European Journal of Operational Research*, 254(1), 80-91, (2016).

Görçün, Ö., F., *Örnek Olay ve Uygulamalarla Tedarik Zinciri Yönetimi*, İstanbul: Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., 18-21, (2016).

He P., & Li J., “The two-echelon multi-trip vehicle routing problem with dynamic satellites for crop harvesting and transportation”, *Appl. Soft Comput.*, 77, 387-398, (2019).

Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J. F., & Crainic, T. G., “An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics”, *Computers & Operations Research*, 39 (12), 3215-3228, (2012).

Irnich, S., Schneider, M., Vigo, D., “Four variants of the vehicle routing problem”, (eds: P. Toth, and D. Vigo), *Vehicle Routing: Problems, Methods*,

and Applications (2nd ed.), MOS-SIAM Series on Optimization, Philadelphia: 242, (2014).

Jacobsen S.K., Madsen O.B.G., “A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem”, *European Journal of Operational Research*, 5, 378-387, (1980).

Jie, W., Yang, Zhang, M., Huang, Y., “The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: formulation and efficient methodology”, *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904, (2019).

Jepsen, M., Spoorendonk, S., Ropke, S., “A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem”, *Transportation Science*, 47 (1), 23-37, (2013).

Jie, W., Yang, J., Zhang, M., & Huang, Y., “The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: formulation and efficient methodology”, *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904, (2019).

Karaoglan I., Cetinkaya C., Gokcen H., “Two-stage vehicle routing problem with arc time windows: A mixed integer programming formulation and a heuristic approach”, *European Journal of Operational Research*, 230 (3), 539-550, (2013).

Kuo, Y., & Wang, C. C., “A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost”, *Expert Systems with Applications*, 39 (8), 6949–6954, <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.024>, (2012).

Laporte, G., Nobert, Y., & Arpin, D., “Optimal solutions to capacitated multidepot vehicle routing problems”, *Congressus Numerantium*, 44, 283–292, (1984).

Letchford, A. N., & Salazar-González, J.J., “Stronger multi-commodity flow formulations of the capacitated vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 244 (3), 730–738, doi:10.1016/j.ejor.2015.02.028, (2015).

Li, H., Zhang, L., Lv, T., & Chang, X., “The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems”, *Transportation Research Part B*, 94, 169-188, (2016).

Li, H., Bai, M., Zhao, Y., & Dai, C., “Vehicle flow formulation for two-echelon time-constrained vehicle routing problem”, *Journal of Management Science and Engineering*, 4(2), 75-90, (2019).

Liu, R., Xie, X., Augusto, V., & Rodriguez, C., “Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care”, *European Journal of Operational Research*, 230 (3), 475–486, <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.044>, (2013).

Liu, T., Luo, Z., Qin, H., Lim, A., “A branch and cut algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints”, *European Journal of Operational Research*, 266(2), (2018).

Meihua, W., Xuhong, T., Shan, C., & Shumin, W., “Hybrid ant colony optimization algorithm for two echelon vehicle routing problem”, *Procedia Engineering*, 15, 3361-3365, (2011).

Mingyong, L., Erbao, C., “An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 188– 195, (2010).

Montoya-Torres, J. R., Lopez Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jimenez, H., & HerazoPadilla, N., “A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots”, *Computers & Industrial Engineering*, 79, 115–129, <http://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>, (2015).

Moshref-Javadi, M. and Lee, S., “The customer-centric, multi-commodity vehicle routing problem with split delivery”, *Expert Systems with Applications*, 56, 1, 335–348, (2016).

Oltermann, P., “Hamburg becomes first German city to ban older diesel cars[online]”, (3 Aralık 2019), <https://www.theguardian.com/world/2018/may/23/hamburg-first-german-city-ban-older-diesel-cars-air-quality-pollution>, (2018).

Polat, O., Kalaycı, C.B, Kulak, O., & Günter, H.-O., “A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery with time limit”, *European Journal of Operational Research*, 242(2), 369-382, (2015).

Perboli G., Tadei R., & Masoero, F., “Models and cuts for the two-echelon vehicle routing problem”, *Proceedings of the International Network Optimization Conference 2009*, Pisa, Italy, (2009).

Perboli G., Tadei R., “New families of valid inequalities for the two-echelon vehicle routing problem”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 639-646, (2010).

Perboli G., Tadei R., Vigo D., “The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics”, *Transportation Science*, 45, 364-380, (2011).

Rahimi-Vahed, A., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W., “Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm”, *Computers & Operations Research*, 53, 9–23, <http://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.004>, (2015).

Raidl, G. R., Baumhauer, T., & Hu, B., “Speeding up logic-based Benders’ decomposition by a metaheuristic for a bi-level capacitated vehicle routing problem, In: International Workshop on Hybrid Metaheuristics, 183-197, Cham, (2014).

Salcan, C., “Nakliye Modları[online]”, (25Temmuz 2019), <https://www.slideshare.net/cafersalcan/nakliye-modlari>, (2012).

Santos, F. A., da Cunha, A. S., & Mateus, G. R., “Branch-and-price algorithms for the two-echelon capacitated vehicle routing problem”, *Optimization Letters*, 7(7), 1537-1547, (2013).

Schirber, M., “Synopsis: Traveling with a quantum salesman[online]”, (9Kasım 2019), <https://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevA.95.032323>, (2017).

Sitek, P., & Wikarek, J., “A novel integrated approach to the modelling and solving of the two echelon capacitated vehicle routing problem”, *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 326-340, (2014).

Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T., “The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations”, *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378, (2015).

Wang, C., Mu, D., Zhao, F., Sutherland, J.W., “A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows”, *Computers & Industrial Engineering*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.02.005>, (2015).

Wang C., Mu D., Zhao F., & Sutherland J.W., “Solving vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery using parallel simulated annealing algorithm”, *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 8 (1), 81-106, (2016).

Wang, K., Shao, Y., & Zhou, W., “Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 262-276, (2017).

Xie X., Liu R., Augusto V., & Rodriguez C., “Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care”, *European Journal of Operational Research*, 230 (3), 475-486, (2013).

Yang J., Jie W., Zhang M., & Huang Y., “The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: formulation and efficient methodology”, *Eur. J. Oper. Res.*, 272 (3), 879-904, (2019).

Yücenur, G. N., & Demirel, N. Ç., “A new geometric shape-based genetic clustering algorithm for the multi-depot vehicle routing problem”, *Expert Systems with Applications*, 38 (9), 11859–11865, <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.077>, (2011).

Zeng, Z. Y., Xu, W. S., Xu, Z. Y., & Shao, W. H., “A hybrid GRASP+VND heuristic for the two-echelon vehicle routing problem arising in city Logistics”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-11, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/517467>, (2014).

Zhong, X., Jiang, S., & Song, H., “ABCGA algorithm for the two echelon routing problem”, *IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 1, 301-308, (2017).



EKLER

8. EKLER

EK A. Veri Setleri

Tablo A.1: Ağdaki düğümlere ait veriler

Düğüm	Ziyaretin Mümkün Olduğu		Servis Süresi (dk)	Koordinatlar	
	En Erken Zaman (dk)	En Geç Zaman (dk)		X	Y
D1	-	-	-	31	24
D2	-	-	-	-9	34
D3	-	-	-	-31	17
D4	-	-	-	-25	-27
D5	-	-	-	0	-31
D6	-	-	-	32	-11
S1	-	-	10	23	8
S2	-	-	10	-14	17
S3	-	-	10	-20	-5
S4	-	-	10	5	-20
S5	-	-	10	20	13
C1	334	354	10	11	0
C2	111	131	10	18	21
C3	187	207	10	-1	-3
C4	234	254	10	-23	-7
C5	226	246	10	-22	9
C6	163	183	10	-1	24
C7	262	282	10	-20	-3
C8	225	245	10	1	10
C9	341	361	10	6	25
C10	187	207	10	-8	-22
C11	207	227	10	2	-4
C12	307	327	10	27	10
C13	350	370	10	15	10
C14	72	92	10	-7	17
C15	139	159	10	6	3
C16	187	207	10	-14	-23
C17	302	322	10	0	0
C18	280	300	10	-29	4
C19	312	332	10	16	-3
C20	162	182	10	-19	-10
C21	184	204	10	5	1
C22	233	253	10	3	-11
C23	88	108	10	15	-18
C24	341	361	10	9	-6
C25	251	271	10	-1	0
C26	321	341	10	1	-4
C27	80	100	10	-9	-8
C28	183	203	10	1	0
C29	336	356	10	-12	0
C30	323	343	10	-8	-3
C31	194	214	10	-2	-7
C32	259	279	10	11	6
C33	298	318	10	24	-5
C34	90	110	10	0	0
C35	79	99	10	-8	-2
C36	129	149	10	-1	9

Tablo A.1: Ağdaki düğümlere ait veriler (devam)

Düğüm	Ziyaretin Mümkün Olduğu		Servis Süresi (dk)	Koordinatlar	
	En Erken Zaman (dk)	En Geç Zaman (dk)		X	Y
C37	335	355	10	0	-1
C38	76	96	10	1	-2
C39	327	347	10	26	-15
C40	147	167	10	-13	-2
C41	317	337	10	1	-23
C42	98	118	10	19	8
C43	226	246	10	-2	-9
C44	70	90	10	2	9
C45	114	134	10	5	-3

Tablo A.2: Ağdaki ürünlere Ait Veriler

Ürün	Hacim (litre/adet)
Ürün 1: Çamaşır Makinesi	300
Ürün 2: Buzdolabı	600
Ürün 3: Televizyon	200

Tablo A.3: Ağdaki müşterilere Ait Talepler

Müşteriler	Çamaşır Makinesi (Ürün 1)		Buzdolabı (Ürün 2)		Televizyon (Ürün 3)	
	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi	Dağıtım Talebi	Toplama Talebi
C1	9	6	1	10	3	1
C2	9	5	3	1	3	8
C3	1	5	3	4	4	5
C4	4	2	4	3	3	3
C5	3	3	7	6	4	7
C6	7	3	3	10	10	2
C7	6	9	4	4	5	7
C8	4	1	8	3	4	9
C9	3	7	7	7	1	6
C10	1	10	3	7	4	9
C11	4	9	3	3	6	7
C12	3	7	6	4	10	4
C13	8	4	8	4	10	4
C14	7	8	8	4	9	7
C15	2	1	3	9	2	2
C16	1	1	4	8	9	6
C17	4	9	2	2	8	6
C18	6	4	9	9	6	1
C19	4	8	3	1	2	7
C20	5	6	9	4	10	7
C21	8	3	2	3	10	9
C22	5	4	2	6	10	6
C23	2	5	10	9	9	9
C24	6	5	6	7	4	6
C25	10	4	2	2	2	9
C26	8	10	2	1	7	4
C27	9	7	9	6	4	8
C28	3	10	2	3	6	1
C29	4	5	3	8	1	3
C30	6	5	1	4	1	7
C31	5	8	1	10	7	8
C32	7	6	2	5	1	1
C33	7	2	2	8	6	3
C34	9	2	8	5	7	7
C35	7	5	7	1	2	6
C36	10	4	1	8	1	4
C37	1	4	10	2	1	9
C38	9	8	3	9	5	1
C39	5	3	4	5	6	5
C40	3	10	1	2	4	3
C41	3	9	7	4	5	7
C42	8	6	9	8	8	10
C43	2	4	9	3	4	2
C44	7	5	6	1	10	5
C45	9	9	6	2	5	9

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammet İkbal Kaya

Doğum Yeri ve Tarihi : Evciler – 25.03.1992

Lisans Üniversite : Fatih Üniversitesi

Elektronik posta : mi.kaya@hotmail.com

İletişim Adresi : Sevindik Mh. 2307 Sk. No:27 Merkezefendi
Denizli

Yayın Listesi :

Konferans listesi :