



**STOKASTİK TOPLAMA TALEPLİ ÇOK DEPOLU EŞZAMANLI TOPLA
DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ**

Beste DESTİCİOĞLU

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Beste DESTİCİOĞLU

06/01/2021

STOKASTİK TOPLAMA TALEPLİ ÇOK DEPOLU EŞZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

(Doktora Tezi)

Beste DESTİCİOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Araç Rotalama Problemi (ARP), farklı lokasyonlarda yer alan müşterilerin dağıtım/toplama taleplerini karşılamak için bir veya birden fazla depodan hareket eden araçların minimum maliyet ile rotalarının belirlenmesi problemidir. Günümüzde rekabet halindeki firmalar pazardan pay elde edebilmek için maliyetlerini düşürmek zorunda kalmaktadır. Maliyetlerini düşürmeye çalışan firmalar da, lojistik maliyetlerini minimuma indirmeye çalışmakta, böylece ARP firmalar için giderek önemli bir konu haline gelmektedir. Firmalar lojistik maliyetlerini düşürmek için müşterilere birden fazla depodan hizmet verebilmekte ve müşterilerin dağıtım talepleri ile toplama taleplerini aynı araç ile gerçekleştirmektedir. Gerçek hayat problemlerini incelediğimizde, taleplerin, müşteri lokasyonlarının veya müşteri hizmet sürelerinin kesin olarak bilinmediği Stokastik Araç Rotalama Problemleri (SARP) ile klasik araç rotalama problemine (KARP) göre daha çok karşılaşıldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ise, en çok Stokastik Talepli Araç Rotalama Probleminin (STARP) araştırmacılar tarafından çalışıldığı dikkat çekmektedir. Bu çalışmada da Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (STT_ÇD_ETDARP) incelenmiştir. Çalışmada, müşterilerin toplama taleplerinin normal dağılımından geldiği varsayılmıştır. Çalışmada öncelikle deterministik talebin yer aldığı Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ÇD_ETD_ARP) için matematiksel model önerisinde bulunulmuş ve bu modelin etkinliği test edilmiştir. Devamında ise STT_ÇD_ETDARP için şans kısıtlı programlama yaklaşımı kullanılarak stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model doğrusal olmayan kısıtlar içerdiğinden, ilk önce stokastik model, doğrusal dönüşüm metodu kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir. Devamında ise rassal olarak oluşturulan test problemleri kullanılarak modelin etkinliği test edilmiştir.

Bilim Kodu : 90615

Anahtar Kelimeler : Çok depolu araç rotalama, eşzamanlı topla dağıt araç rotalama, stokastik talep, şans kısıtlı programlama

Sayfa Adedi : 131

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Bahar ÖZYÖRÜK

MULTI DEPOT SIMULTANEOUSLY PICK-UP AND DELIVERY VEHICLE
ROUTING PROBLEM WITH STOCHASTIC PICK-UP DEMAND

(Ph. D. Thesis)

Beste DESTİCİOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

Vehicle Routing Problem (VRP) is the problem of determining the routes of vehicles moving from one or more depots at minimum cost to satisfy the distribution/ collection demands of customers in different locations. Today, competing companies have to reduce their costs in order to get a share from the market. Companies attempting to reduce their costs try to minimize logistics costs, thus VRP is becoming an increasingly important issue for companies. Companies can serve customers from more than one depot and satisfy their distribution and collection requests with the same vehicle in order to reduce their logistics costs. When we examine the real-life problems, it is seen that Stochastic Vehicle Routing Problems (SVRP) whose demands, customer locations or customer service times are not known exactly, are encountered more frequently than the classical VRP. When the studies in the literature are examined, it is noteworthy that the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand (VRP_SD) is mostly studied by the researchers. In this study, Multi Depot Simultaneous Pick up and Delivery Vehicle Routing Problem with Stochastic Pick up Demand (MD_SPDVRP_SP) was investigated. In this study, it was assumed that the pick up demands of the customers came from the normal distribution. Firstly, the mathematical model was proposed for the Multi Depot Simultaneous Pick Up and Delivery Vehicle Routing Problem (MD_SPD_VRP) where deterministic demand is present and the effectiveness of this model is tested in this study. Subsequently, the stochastic programming mode is developed for MD_SPDVRP_SP by using a chance constrained programming approach. Since the developed model contains nonlinear constraints, the stochastic model is linearized using the linear transformation method firstly. Then, the effectiveness of the model is tested by using randomly generated test problems.

Science Code : 90615

Key Words : Multi depot vehicle routing, simultaneously pick-up and delivery vehicle routing, stochastic demand, chance constraint programming

Page Number : 131

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Bahar ÖZYÖRÜK

TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, gösterdiği özveri ile hiç bir zaman destegini ve engin bilgilerini benden eksik etmeyen, değerli hocam ve sayın danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bahar ÖZYÖRÜK'e, tez izleme komitesinde yer alan tecrübelerinden ve fikirlerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof.Dr. Serpil EROL ile Doç. Dr. Hatice ÇALIPINAR'a, doktora eğitimim boyunca üzerimde emeği olan Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bana destek olan Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Müdürü Sayın Doç.Dr. Hüsnü ÖZLÜ'ye ve Enstitü Müdür Yardımcısı Sayın Dr. Hüseyin Alper İRTEM'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez çalışmam süresince her umutsuzluğa kapıldığımda bana destek olup çalışmama kaldığım yerden devam etmemi sağlayan canım arkadaşım Arş. Gör. Merve ASİLOĞULLARI'na ve çalışma arkadaşlarım Öğr. Gör. Orhun DÖŞ, Öğr. Gör. Fikret BAYKALI, Öğr. Gör. Yunus Emre KARAKOCA'ya teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca sabırla hep yanımda olan, bana hep güvenerek bu mesleğe geçişimde de beni destekleyen, maddi ve manevi desteğini benden hiç bir zaman esirgemeyen annem Ayşe DESTİCİOĞLU, babam Semih DESTİCİOĞLU ve ağbim Erhan DESTİCİOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ.....	5
2.1. Araç Rotalama Problemi Çeşitleri.....	6
2.2. Stokastik Araç Rotalama Problemi	10
2.2.1. Stokastik talepli araç rotalama problemi.....	11
2.2.2. STARP için literatür taraması	14
2.3. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi.....	31
2.3.1. ÇDARP için literatür taraması	32
2.4. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi.....	43
2.4.1. ETD_ ARP için literatür taraması	44
3. STOKASTİK TOPLAMA TALEPLİ ÇOK DEPOLU EŞZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ.....	53
3.1. ÇD_ETD_ ARP İçin Geliştirilen Matematiksel Programlama Modeli.....	53
3.2. Test Problemlerinin Oluşturulması.....	58
3.2.1. Deneyisel karşılaştırmalar	59
3.3. STT_ÇD_ETDARP İçin Geliştirilen Modelin Varsayımları	67

Sayfa

3.4. STT_ÇD_ETDARP İçin Önerilen Matematiksel Model	68
4. STT_ÇD_ETDARP İÇİN GELİŞTİRİLEN MODELİN ETKİNLİĞİNİN TEST EDİLMESİ	73
4.1. Stokastik Modelin Doğrusal Hale Getirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler.....	73
4.1.1. Ayrık programlama metodu	73
4.1.2. Doğrusal dönüşüm metodu	74
4.1.3. Doğrusal yaklaşım metodu.....	76
4.2. Geliştirilen Modele Doğrusal Yaklaşım Metodunun Uygulanması.....	77
4.2.1. Doğrusal yaklaşım metoduyla doğrusallaştırılan model	78
4.3. STT_ÇD_ETDARP İçin Test Problemlerinin Oluşturulması	81
4.3.1. Doğrusallaştırılmış STT_ÇD_ETDARP modeli ile ÇD_ET_ARP'nin deterministik modelinin karşılaştırılması	82
4.3.2. Farklı boyuttaki test problemleri ile modelin etkinliğinin analizi.....	83
4.3.3. Doğrusallaştırılan modelde değişkenlerin etkisinin analizi	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	95
EKLER.....	115
EK-1. STARP, ÇDARP ve ETD_ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi ...	116
EK-2. 10 müşterili deterministik problemin GAMS kodları	122
EK-3. 15 müşterili doğrusallaştırılmış stokastik modelin GAMS kodları.....	124
EK-4. Stokastik ile deterministik modelin karşılaştırılması için çözülen örnek.....	127
ÖZGEÇMİŞ	130

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çok depolu ve tek depolu problemler için matematiksel modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	62
Çizelge 4.1. Modelin %97,5 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar.....	84
Çizelge 4.2. Modelin %95 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar.....	85
Çizelge 4.3. Modelin %90 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar.....	86
Çizelge 4.4. $\sigma = 0,10$ olduğunda elde edilen sonuçlar.....	88
Çizelge 4.5. $\sigma = 0,15$ olduğunda elde edilen sonuçlar.....	88
Çizelge 4.6. $\sigma = 0,20$ olduğunda elde edilen sonuçlar.....	88
Çizelge 4.7. Güvenilirlik düzeyi %97,5 olduğunda elde edilen sonuçlar	89
Çizelge 4.8. Güvenilirlik düzeyi %95 olduğunda elde edilen sonuçlar	89
Çizelge 4.9. Güvenilirlik düzeyi %90 olduğunda elde edilen sonuçlar	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. ÇDARP şebeke örneği	31
Şekil 3.1. Örnek problemde elde edilen sonuçların şebeke üzerinde gösterilmesi.....	57
Şekil 3.2. Stokastik toplama talepli ÇD_ETD_ARP için örnek şebeke	68
Şekil 4.1. Örnek problemin doğrusallaştırılmış model ile çözülmesinde elde edilen sonuçların şebeke üzerinde gösterilmesi	80



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Düğümleeri birbirine bağlayan ayrıtlar kümesi
B_k	k deposunun kapasitesi
c_{ij}	Düğümleer arasındaki uzaklık
d_i	i müşterisinin dağıtım talebi
$G (N, A)$	Yönlü graf
M_k	k deposundan hareket eden araç sayısı
N	Tüm müşterilerden ve depolardan
N_c	Müşterilerin kümesi
N_s	Depoların kümesi
Q	Araç kapasitesi
q_i	i müşterisinin toplama talebi
r_i	x ve y koordinatlarının birbirine oranı
U_i	Araçtaki dağıtılacak ürün miktarını gösterir yardımcı karar değişkeni
V_i	Araçtaki toplanan ürün miktarını gösterir yardımcı karar değişkeni
x_{ij}	(i, j) ayrıtı tur üzerindeyse 1, yoksa 0 değerini alan karar değişkeni
y_{ik}	i müşterisi k deposuna atandıysa 1, yoksa 0 değerini alan karar değişkeni
Z^{AS}	7200 saniye sonucunda ulaşılan alt sınır değeri
$Z^{ÜS}$	7200 saniye sonucunda ulaşılan üst sınır değeri
α	Güvenilirlik seviyesi
μ_i	i müşterisinin talebinin ortalaması
σ_i	i müşterisinin talebinin standart sapması
σ_i^2	i müşterisinin talebinin varyansı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ARP	Araç rotalama problemi
AU-ARP	Açık uçlu araç rotalama problemi
CCP	Şans kısıtlı programlama
ÇDARP	Çok depolu araç rotalama problemi
ÇD_ETD_ARP	Çok depolu eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi
ÇD_STARP	Çok depolu stokastik talepli araç rotalama problemi
ÇD_YARP	Çok depolu yeşil araç rotalama problemi
DARP	Dinamik araç rotalama problemi
EÇUPS	Eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı
ETD_ARP	Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi
FIFO	İlk giren ilk çıkar prensibi
GRASP	Rassal ağgözlü adaptif arama prosedürü
GSP	Gezgin Satıcı Problemi
HMOEA	Hibrit çok amaçlı evrimsel algoritma
KARP	Klasik araç rotalama problemi
KK_ARP	Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi
KTD_ARP	Karma topla dağıt araç rotalama problemi
KU_ARP	Kapalı uçlu araç rotalama problemi
MHA	Modüler sezgisel algoritma
MINLP	Karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama
MK_ARP	Mesafe kısıtlı araç rotalama problemi
NP-Zor	Polinom zamanda çözüm bulunamayan problemler
OÇS	Ortalama çözüm süresi
ÖDST_ARP	Önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi
PARP	Periyodik araç rotalama problemi
SARP	Stokastik araç rotalama problemi
SPR	Yardımcı eylemli stokastik programlama
S_ARP	Statik araç rotalama problemi
STARP	Stokastik talepli araç rotalama problemi
ST_ETD_ARP	Stokastik talepli eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****ST_TD_ARP**

Stokastik talepli topla dağıt araç rotalama problemi

STT_ÇD_ETDARP

Stokastik toplama talepli çok depolu eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi

TD_ARP

Topla dağıt araç rotalama problemi

YSD

Yüzde sapma değeri

ZP_ARP

Zaman pencereci araç rotalama problemi

ZP_ETD_ARP

Zaman pencereci eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi

ZP_STARP

Zaman pencereci stokastik talepli araç rotalama problemi

1. GİRİŞ

Küreselleşen dünyada firmalar ürünlerini müşterilerine sunarken, rakip firmalar ile rekabet edebilmek için zorlu şartlar altında mücadele etmek zorunda kalmaktadır. Firmaların, pazardaki rakip firmalara karşı avantaj sağlamak amacıyla müşteri memnuniyetini sağlamaları için maliyetlerini en düşük seviyeye indirmeleri gerekmektedir. Bu yüzden firmaların dağıtım maliyetlerini minimuma indirmeleri, yani, en ekonomik şekilde müşterilere hizmet verecek dağıtım ağlarını oluşturmaları gerekmektedir.

Lojistik, ulaştırma, dağıtım ve tedarik zinciri yönetiminde firmaların karşılaştığı operasyonel problemlerden biri Araç Rotalama Problemi (ARP) dir. Farklı lokasyonlarda yer alan müşterilerin dağıtım /toplama taleplerinin, tek veya çok araç kullanılarak, tek veya daha fazla depodan en düşük maliyet ile rotaların belirlenmesi problemi literatürde ARP olarak bilinmektedir. ARP’de amaç, toplam maliyeti, toplam süreyi veya toplam yakıt tüketimini minimize edecek şekilde en uygun rotaların oluşturulmasıdır. Firmaların artan rekabet şartlarına uyum sağlayabilmeleri için, müşterilerin memnuniyetini en üst seviyede kılacak şekilde araç rotalarının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bu yüzden ARP ve çeşitleri son yıllarda araştırmacılar tarafından ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Araştırmacılar ARP’nin farklı türleri için matematiksel model geliştirmelerinin yanı sıra, orta ve büyük boyuttaki problemleri çözebilecek sezgisel ve metasezgisel algoritma önerilerinde de bulunmuşlardır.

Yeryüzündeki kaynakların sınırlı olması ve zaman içinde tükenmesi, müşterilerin çevre kirliliği ve geri dönüşüm hakkında bilinçlenmesi gibi nedenlerden dolayı tersine lojistik faaliyetleri günümüzde firmalar için önemli bir konu haline dönüşmüştür. Firmalar geri dönüşüm için gerçekleştirdikleri bu taşıma türünde, maliyetleri düşürmek için, müşterilerden gerçekleşen toplama talepleri ile müşterilere yapılacak olan dağıtım taleplerini aynı aracı kullanarak gerçekleştirmektedir. Literatürde bu problem tipi Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_ARP) olarak bilinmektedir. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD_ARP) de, TD_ARP’nin genelleştirilmiş bir çeşidi olarak literatürde yer almaktadır. Bu problem tipinde, müşterinin dağıtım talebini karşılamak için araç müşterinin yer aldığı lokasyona gittiğinde, müşterinin toplama talebini de eş zamanlı olarak gerçekleştirmektedir. Bu durum hem müşteri memnuniyetini artırdığı hem de

firmaların taşıma maliyetlerini düşürdüğü için araştırmacılar için ilgi çeken bir konu haline dönüştürmüştür. Bu yüzden de son yıllarda literatürde ETD_arp konusunda birçok çalışma yapılmıştır.

Firmalar müşteri memnuniyetini sağlamak, müşteri taleplerini daha hızlı karşılayabilmek için müşterilerine birden fazla depodan hizmet vermektedir. Birden fazla depodan müşterilerin taleplerinin karşılanarak en uygun araç rotalarının belirlendiği problem çeşidi ise literatürde Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇDARP) olarak bilinmektedir. Klasik Araç Rotalama Probleminde (KARP) bile, orta ve büyük boyutlu problemlerde polinom zamanda çözüm bulunulamazken, daha karmaşık yapıda olan ÇDARP'ye de polinom zamanda çözüm bulunamayacağı açıktır. Literatürde ÇDARP konusunda hem matematiksel model önerisinde bulunulan hem de modelin çözümü için sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin geliştirildiği birçok çalışma yer almaktadır.

Gerçek hayat problemlerini incelediğimizde, müşterilerin taleplerinin her zaman deterministik özellikte olmadığı görülmektedir. Bu yüzden, son yıllarda müşteri taleplerinin dinamik ve stokastik olduğu ARP'ler araştırmacıların dikkatini çeken bir konu haline gelmiştir. Stokastik Araç Rotalama Problemi (SARP), deterministik özellikteki ARP'de bir veya daha fazla parametrenin kesin olarak bilinmemesi durumunda ortaya çıkan problem türüdür. Müşterilerin yer aldığı lokasyonlar, müşteri talepleri, hizmet süresi veya seyahat süresi stokastik olabilir. SARP konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların daha çok Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi (STARP) üzerine yoğunlaştıkları dikkat çekmektedir. STARP'de müşteri taleplerinin belirli bir olasılık dağılımına sahip rassal değişkenlerden oluştuğu kabul edilmektedir.

STARP konusunda literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların genelde probleme matematiksel model önerisinde bulunmak ve problemi çözebilecek özellikte sezgisel ve metasezgisel yöntemler üzerine yapıldığı dikkat çekmektedir. Literatürde STARP'de zaman penceresi, birden fazla depodan müşterilere hizmet verilen çok depolu problem tipinin ve topla/dağıt ile eş zamanlı topla/dağıt kısıtlarının yer aldığı az sayıda çalışmanın bulunduğu, ancak bu kısıtları birlikte içeren problem türünü inceleyen bir çalışma yapılmadığı dikkat çekmektedir.

Bu çalışma kapsamında ETD_ARP, ÇDARP ve STARP hakkında ayrıntılı bir literatür taraması yapılmış olup, araştırma sonucunda, Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin (STT_ÇD_ETDARP) daha önce çalışılmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada STT_ÇD_ETDARP incelenmiştir. İncelenen problemde, müşterilerin dağıtım taleplerinin deterministik olduğu, yani araç rotaya başlamadan önce kesin olarak bilindiği, toplama taleplerinin ise normal dağılıma sahip rassal değişkenlerden oluştuğu kabul edilmiştir.

Tezin diğer bölümleri aşağıda belirtilen şekilde oluşturulmuştur.

Çalışmada ilk olarak ARP ile KARP'ın hakkında bilgi verilmiş, farklı varsayımlar altında meydana gelen ARP çeşitleri ele alınmış ve SARP, ÇDARP ile ETD_ARP çeşitleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş ve bu problem için yapılan literatür taraması sunulmuştur.

Çalışmanın üçüncü bölümünde deterministik Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ÇD_ETD_ARP) için bir matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Devamında geliştirilen matematiksel modelin etkinliği, literatürde yer alan test problemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sonrasında ise, STT_ÇD_ETDARP için şans kısıtlı programlama yaklaşımı kullanılarak bir stokastik programlama modeli geliştirilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, doğrusal olmayan matematiksel modelin doğrusal hale dönüştürülmesinde literatürde bulunan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Devamında geliştirilen stokastik programlama modelinin doğrusal hale dönüştürülmesinde en uygun yöntemin doğrusal yaklaşım metodu olduğu belirlenmiş ve literatürdeki test problemlerinden faydalanılarak geliştirilen model için müşteri sayısının 10-50 aralığında değişen farklı boyutlarda test problemleri oluşturulmuştur. Doğrusal hâle dönüştürülen modelin doğru çalıştığının analizini yapmak için aynı şartlar altında problem hem deterministik hem de doğrusal hale dönüştürülmüş modelde çözülerek her iki durumda da problemin çözümüyle aynı sonucun elde edildiği belirlenmiş olup, modelin doğru bir şekilde çalıştığı tespit edilmiştir. Devamında müşteri menuniyetinin sağlanması için ilk olarak güvenilirlik düzeyi %97,5 alınarak hesaplama yapılmış, devamında farklı boyuttaki problemlerde güvenilirlik düzeyi değiştirilerek problem üzerindeki etkisi analiz edilmeye çalışılmıştır. Sonrasında ise, araç kapasitesinin, standart sapma değişimi ile güvenilirlik

düzeyinin değiştirilmesinin problemin amaç fonksiyonu ve çözüm süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Son bölümde ise, bu çalışmada ele alınan problem hakkında genel bir değerlendirme ve bulunan sonuçlar hakkında ayrıntılı bir analiz yapılmıştır. Devamında ise gelecekte yapılacak olan çalışmalara ışık tutması için yapılabilecek çalışmalar konusunda önerilerde bulunulmuştur.



2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Araç rotalama problemi (ARP), bir veya daha fazla depodan hareket eden araçların, farklı kısıtlar altında (zaman penceresi, araç kapasitesi, mesafe kısıtı vb.) müşterilerin dağıtım ve/veya toplama taleplerini karşıladıktan sonra tekrar depoya dönerek araçların rotalarının belirlendiği problemidir. ARP’de, problem boyutu arttıkça modelin kesin yöntemlerle polinom zamanda çözülmesi zorlaştığı için NP-zor özellikte bir problemidir. ARP’nin araştırmacılar tarafından bu kadar ilgi çekici bir alan olmasının en önemli nedeni; lojistik, çizelgeleme, stok ve hizmet yönetimi, üretim planlama vb. gibi konularda karşılaşılabilen önemli endüstri mühendisliği problemlerinden biri olmasının yanında, NP-zor problemler içerisinde bulunmasıdır [1].

ARP terimi ilk kez 1950’li yıllarda Dantzig ve Ramser tarafından literatüre kazandırılmıştır. Dantzig ve Ramser yaptıkları çalışmada, benzin dağıtımı için oluşturulacak rotalarda taşıma maliyetini minimize etmeyi amaçlamışlardır. Daha sonra bu problemin çözümü için Tasarruf Algoritmasını kullanmışlardır [2]. Günümüzde de, bilgi ve iletişim teknolojisindeki gelişmelerden faydalanarak, rekabet altında müşterilere daha hızlı hizmet vermek ve müşteri tatminini sağlamak için değişken durumları içeren stokastik ve dinamik özellikteki ARP’ler araştırmacılar tarafından dikkat çeken bir konu haline gelmiştir. Bu özellikleri içeren ARP’yi kesin yöntemlerle çözemeyen araştırmacılar, problemlerin çözümü için sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanmışlardır [3].

ARP’de araçların rotası belirlenirken aşağıda belirtilen varsayımlar dikkate alınmaktadır:

- Rotada yer alan müşteriler sadece bir araç tarafından bir defa ziyaret edilir.
- Bütün müşterilerin dağıtım/ toplama talepleri karşılanmalıdır.
- Bir aracın rotası bir depoda başlar ve rota sonunda aynı depoda sonlanır.
- Araç sayısının belirlenmesi ve rotaların oluşturulması ile ilgili kısıtlar kullanılır [4].

Klasik araç rotalama probleminde (KARP) müşteri talepleri deterministik özellik göstermektedir, yani müşteri taleperinin rotalama öncesinde kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır. Bu problem tipinde araçlar homojendir ve eşit kapasiteye sahiptir. Problemin amacı, tüm müşterilere hizmet verilmesi durumunda toplam maliyeti minimize

edecek uygun araç rotalarının belirlenmesidir. KARP, araç filosunun harekete başladığı bir depo, depoda yer alan yeterli sayıdaki ve eşit kapasiteli araç filosu, talep ve lokasyonları önceden bilinen müşterilerden oluşmaktadır [2].

2.1. Araç Rotalama Problemi Çeşitleri

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, farklı kısıtlar altında ARP'nin birçok çeşidinin incelendiği görülmektedir. Bu ARP çeşitleri; KARP'e gerçek hayat problemlerini dikkate alan yeni kısıtların ve değişkenlerin eklenmesi ile geliştirilmiştir. Bu bölümde ARP çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminde (KK_ARP), müşterilere ait talep miktarları kesin olarak bilinmektedir. KK_ARP'de tek bir depo yer almaktadır ve aynı kapasiteye sahip araçlar bu depodan hareket etmektedir. Bir rotadaki müşterilerin toplam talebi, onlara hizmet veren aracın kapasitesini aşamaz. KK_ARP'nde amaç, araçların kapasitesi aşılmadan, tüm müşterilere hizmet verecek şekilde araçların toplam seyahat mesafesinin en küçüklenmesidir [5].

Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (MK_ARP), araçların rota içinde gidebilecekleri mesafenin sınırlandırıldığı problem tipidir. Araçların kat ettikleri mesafe, ziyaret ettikleri müşteriler için gittikleri mesafeye bağlı olarak birbirinden farklı olabilir ama hiçbir şekilde belirlenen mesafe kısıtını aşamaz [6].

Süre bağımlı ARP, müşteriler arası seyahat süresinin gün içinde değiştiği ve her müşteriye geliş ve gidiş saatlerinin önceden belirlenmiş olan süre aralığı içerisinde gerçekleştirilmesinin gerektiği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Buna göre, planlama periyodu belli zaman aralıklarına bölünmektedir ve araçlar bu aralıklarda sabit bir hız ile rotalarını tamamlamaktadır. Bir müşteriden hareket eden araç çıkış zamanına ve devam edeceği rotaya göre sabit bir hız ile hareket ederek sonraki müşteriye doğru hareketini gerçekleştirmektedir. Eğer müşteriye gidiş esnasında bir sonraki zaman periyoduna geçilirse, araç yeni zaman dilimi için belirlenmiş hız ile hareketine devam edecektir [6].

Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_arp), depolardan müşterilerin dağıtım taleplerinin yanında, müşterilerden depolara gönderilecek olan toplama taleplerinin de aynı araçla gerçekleştirildiği problem tipidir. TD_arp'ye, depozitolu ürünlerin marketlere dağıtılıp toplanması, sağlık sisteminde kanların merkezden alınıp hastanelere taşınması ve toplama merkezlerine kan taşınması, otomobillerin yedek parçalarının gönderilmesi ve arızalı parçaların geri dönüşüm için toplanması, günlük taze ürünlerin marketlere dağılımı ve bozulmuş ürünlerin ise toplanması örnek olarak verilebilir [4]. TD_arp'de müşterilerin dağıtım talepleri ve toplama talepleri önceden bellidir ve araç filosunda yer alan tüm araçların homojen olduğu kabul edilmektedir. TD_arp'de, rota üzerinde, aracın müşterilerden topladığı ürün miktarı ile araçtaki müşterilere dağıtacak ürün miktarının toplamı, rotanın hiçbir noktasında, aracın toplam kapasitesini aşmamalıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda TD_arp'nin üç çeşidinin incelendiği görülmektedir [7]:

Önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi (ÖDST_arp)'nde müşteriler, dağıtım yapılacak müşteriler ve toplama yapılacak müşteriler olarak iki kısma bölünmektedir. Bu problem tipinde, rotasına devam eden araç, dağıtım talebi olan müşterilerine, toplama talebi bulunan müşterilerine göre daha önce hizmet vermektedir. Bu varsayım genel olarak, araç içindeki müşterilere yapılacak olan dağıtım talepleri ile müşterilerden toplaması yapılan toplama taleplerinin beraber yerleştirilmesinin araç kapasitesi açısından elvermediği durumlarda dikkate alınmaktadır. Bundan dolayı, ÖDST_arp'de araç ilk olarak müşterilerin dağıtım taleplerini karşılar. Araç müşterilerin dağıtım talepleri karşılandıktan sonra ise müşterileri toplama talepleri için ziyaret eder [6].

Karma topla dağıt araç rotalama problemi (KTD_arp)'de araç, müşterilerin dağıtım talepleri ile toplama taleplerini karışık sırada karşılayabilmektedir. KTD_arp'ye örnek olarak, sağlık sektöründe kanların merkezlerden hastanelere dağıtımı sırasında toplama kamplarından merkeze yeni kanların götürülmesi, dağıtım merkezlerden kargoların müşterilere götürülmesi ve müşterilerden gönderecekleri kargoların toplanması, vb. verilebilir [6].

Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama probleminde (ETD_arp) araç tarafından ziyaret edilen müşterinin bir taraftan dağıtım talebi karşılanırken diğer taraftan toplama talebi eş zamanlı olarak karşılanmaktadır. Bu varsayım ile araç önce müşteriye teslim edilecek olan ürünü bırakmakta sonrasında ise müşterinin depoya göndereceği ürünü teslim almaktadır.

Gıda sektöründe depozitolu meşrubatların önce marketlere bırakılıp daha sonra boş şişelerin alınarak arabaya yüklenmesi, yedek parçaların depolara dağıtımı sırasında kullanılmış/yıpranmış parçaların da geri dönüşüm için fabrikalara/depolara gönderilmesi, ETD_ARP'ye örnek olarak verilebilir [7].

Müşteri taleplerinin belirli zaman aralıkları içerisinde karşılanması, zaman pencereci araç rotalama problemi (ZP_ARP) olarak literatürde yer almaktadır. Bu problem tipinde müşteriye hizmet verilirken en erken ve en geç hizmet zamanlarının yer aldığı bir zaman aralığı dikkate alınır [8]. ZP_ARP'de müşterilere sadece belirlenen zaman penceresi içerisinde hizmet verilebilmektedir. Literatürde iki tip ZP_ARP yer almaktadır:

Sıkı zaman pencereci araç rotalama probleminde araçlar, sadece belirlenen zaman penceresi içerisinde müşterilere hizmet verebilmektedir. Zaman penceresi dışında müşterilere hizmet verilmemektedir [8]. Müşterilere belirlenen zaman penceresi dışındaki herhangi bir zaman dilimi içerisinde de hizmet verilen ARP ise literatürde esnek ZP_ARP olarak bilinmektedir. Ancak bu durumda belirlenen zaman penceresi dışında müşteriye hizmet verildiğinden dolayı bir ceza maliyetine katlanılmaktadır [8].

Parçalı dağıtımlı ARP'de, araç kapasitesini aşan müşteri talepleri bölünerek, müşteriye birden fazla araç tarafından hizmet verilmektedir. Bu yüzden de, müşterinin talep etmiş olduğu miktar, aracın kapasitesinden daha fazla olabilir. Bu durumda müşteri siparişleri parçalanarak, aynı müşteriye gidilerek talebi karşılanmış olur [6].

Periyodik araç rotalama probleminde (PARP), müşterilere hizmet verilecek olan belli dönemler için bir plan oluşturulmaktadır. Oluşturulan plan içerisinde, hizmet verilmesi gereken tüm müşteriler ziyaret edilmelidir. KARP'tan farklı olarak bu problemde, müşteri ihtiyaçlarına bağlı olarak planlanan süre içerisinde müşterilere birden fazla kez hizmet verilebilmektedir. PARP'de müşterilere yapılacak olan ziyaret sayısı, müşterilerin talep miktarlarına, araç kapasitesine ve depo kapasitesine göre belirlenmektedir. PARP'de hizmet verilecek müşteriler için belirli bir sıra yoktur fakat her müşteriye hangi periyot içerisinde hizmet verilmesi gerektiğine dair bir liste vardır [9].

Rotada yer alan tüm müşterilere hizmet verildikten sonra aracın depoya geri dönmemesine veya en son müşteriye hizmet verdikten sonra rotanın aracın rotasını tamamlaması durumuna göre ARP, Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AU_ARP) ve Kapalı Uçlu Araç Rotalama Problemi (KU_ARP) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

AU_ARP, literatürde yer alan KARP'ten farkı, araçların tüm müşterilerin talebi karşılandıktan sonra rotalarını depoda değil, son hizmet verdiği müşteride tamamlanmasıdır [6]. KU_ARP'de ise araçların rotalarının hepsi bir depodan başlamakta ve rotalar araçların harekete başladıkları depoda sonlanmaktadır. Dağıtım araçları depodan hareket ederek müşterilerin dağıtım taleplerini gerçekleştirdikten sonra, araçların depoya geri dönmesi veya gazete dağıtım araçlarının hareketleri ile çöp toplama işleri de bu problem tipine örnek olarak verilebilir [6].

Çevredeki değişiklikleri dikkate alan ARP'ler, statik araç rotalama problemi (S_ARP) ve dinamik araç rotalama problemi (DARP) olmak üzere iki çeşittir. S_ARP, müşteri taleplerinin kesin olarak bilindiği durumda, araçlar için uygun rotaların oluşturularak toplam gidilen mesafenin minimize edilmesinin amaçlandığı problem tipidir. S_ARP'de araçların rotaları belirlenmeden önce, oluşturulacak rotalarla ilgili tüm bilgilerin bilinmesi ve araçların rotaları belirlendikten sonra, rotaya ve müşterilere ilişkin bilgilerin değiştirilmemesi gerekmektedir [10]. DARP, araçların rotaları belirlenip araçlar hareketlerine başladıktan sonra, müşteri taleplerinde değişiklik yaşanması veya yeni müşterilerin ortaya çıkması gibi beklenmedik durumlarla karşılaşarak, bu durumlara karşı yeni rotalarının belirlendiği problem tipidir. KARP'ta rotalama işlemi gerçekleştirildikten sonra yeni veri girişi olmazken, DARP'ta rotaya başladıktan sonra yeni veriler eklenmekte ve rotalar bu veriler dikkate alınarak güncellenmektedir [4].

Araç filosuna göre ARP'ler, homojen filolu ARP ve heterojen filolu ARP olarak iki gruba ayrılmaktadır. Müşteri taleplerini karşılamak için depodan hareket eden araçların aynı kapasitede ve aynı özellikte olan problem, literatürde homojen filolu ARP olarak bilinmektedir. Araç kapasite kısıtlarının tek tip olmadığı, farklı özellikte araçların kullanıldığı, araç rotalama problemleri literatürde heterojen filolu ARP olarak bilinmektedir [1].

Yol durumuna göre ARP'ler, simetrik ARP ve asimetrik ARP olarak ikiye ayrılmaktadır. Müşterilerin dağıtım /toplama taleplerini gerçekleştiren araçların bir müşteriden başka bir müşteriye giderken ve dönerken kat ettikleri mesafe ile seyahat süresinin birbirine eşit olduğu araç rotalama problemi literatürde Simetrik ARP olarak bilinmektedir [6]. Müşterilerin dağıtım /toplama taleplerini gerçekleştiren araçların bir müşteriden diğer müşteriye giderken kat ettikleri mesafe ile dönerken kat ettikleri mesafe birbirine eşit olmadığı problem, Asimetrik ARP'dir. Bu problem tipinde talepleri karşılanacak müşterilerin sıralanması ve araçların dönüş rotalarının belirlenmesi önemlidir [6].

Günümüzde araştırmacılar, ARP'ye yeni kısıtlar ekleyerek ve farklı varsayımlar altında problemi gerçek hayatta karşılaşılabilecek durumlar için uyarlamaktadır. ARP konusundaki literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu problemin, tek depolu-çok depolu, tek araçlı-çok araçlı, zaman pencereli- zaman kısıtlı, dinamik-statik, sadece dağıt, topla-dağıt veya eş zamanlı topla dağıt gibi çeşitli kısıtlar altında çalışıldığı görülmektedir. Literatürde en çok çalışılan ARP türlerinin aynı zamanda müşterilerin toplama ve dağıtım taleplerinin gerçekleştirildiği ETD_ARP ile birden fazla deponun yer aldığı Çok Depolu ARP (ÇDARP) olduğu görülmektedir. Bu konularda yapılan çalışmaların ayrıntılı incelemesi Desticioğlu ve Özyörük'ün 2018 yılında yapmış olduğu çalışmada ele alınmıştır [11].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Stokastik Toplama Talepli Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin (STT_ÇD_ETDARP) daha önce incelenmediği tespit edildiğinden dolayı bu çalışmada STT_ÇD_ETDARP ele alınmıştır. Bundan yüzden de bu bölümde Stokastik Araç Rotalama Problemi, Çok Depolu Araç Rotalama Problemi ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2. Stokastik Araç Rotalama Problemi

Gerçek hayat problemlerinde, değişen şartlara göre müşterilerin taleplerinin gün içerisinde farklılaşabileceği görülmektedir. Örneğin müşterinin talebi, araç müşterinin bulunduğu lokasyona gidene kadar bilinmemekte veya hizmet verilecek müşterilerde rota belirlendikten sonra müşteri talebinde değişiklikler yaşanabilmektedir. Literatürde bu tür problemler Stokastik Araç Rotalama Problemi (SARP) olarak incelenmektedir. Bu

bölümde, SARP hakkında ile müşteri taleplerinin belirli bir olasılık dağılımını sağladığı, Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi (STARP) hakkında bilgi verilmiştir.

SARP, deterministik özellikteki ARP’de bir veya birkaç değişkenin tam olarak bilinmediği durumlarda karşımıza çıkmaktadır. Kesin olarak bilinmeyen değişkenler servis süresi, müşteri talepleri, seyahat süresi veya müşteriler olabilir. [12]. Söz konusu ARP türünde de amaç, rotada yer alan tüm müşterilerin taleplerini karşılarken, beklenen rotalama maliyetinin veya mesafenin minimize edilmesidir. Ancak bu problem tipinde, araç rotaları oluşturulduktan sonra, stokastik bilgilerde bir değişiklik yaşandığında, rotaların güncellenmesi gerekebilmektedir. Oluşturulan rota, müşterilerin başlangıçta belirtmiş oldukları taleplere göre belirlenmektedir. Araç, bir depoda hareketine başlayıp, rotaya devam ederken, bir müşterinin talebi karşılandıktan sonra, araç ya sonraki müşterinin talebini karşılamak için hareket eder ya da araçta yeterli ürün kalmadığından dolayı, araca yeniden yükleme yapmak için depoya döner [12]. SARP, kullanılan değişkenlerin stokastik bilgi içermelerine göre, Stokastik Müşterili ARP, Stokastik Talepli ARP, Stokastik Servis Süreli ARP, Stokastik Seyahat Süreli ARP gibi çeşitlere ayrılmaktadır. Literatürdeki SARP konusunda yapılmış çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların daha çok STARP konusunda çalıştığı tespit edilmiştir. Bu problem türünün özelliği, müşteri taleplerinin dağılımları bilinen rassal değişkenlerden oluşmasıdır [3].

ARP polinom zamanda çözüm bulunamayan, NP-zor sınıfında yer alan bir problemdir ve gerçek hayatta karşılaşılan problemlerde, problem boyutunun giderek artması ve karşılaşılan durumlarla ilgili probleme yeni kısıtlar eklenmesi, problemin kesin yöntemler kullanılarak çözülebilmesini imkânsız hale getirmektedir. ARP’nin deterministik hali bile polinom zamanda çözülemezken, problemin daha karmaşık yapıda olan stokastik halinin de kesin yöntemlerle makul sürede çözülemeyeceği açıktır. Bu yüzden, literatürdeki SARP konusundaki çalışmalarda da, problemlerin çözümleri için sezgisel ve metasezgisel yöntemlere başvurulduğu dikkat çekmektedir [12].

2.2.1. Stokastik talepli araç rotalama problemi

STARP, araç hareketine başladığında, müşteri taleplerinin kesin olarak bilinmediği ve talebin ancak araç müşterinin yer aldığı noktaya ulaştığında öğrenildiği problem tipidir. Bu problem çeşidinde, müşteri taleplerinin belirli bir olasılık dağılımından geldiği

varsayılmaktadır [13]. Bisküvi/ kola otomatlarının stok miktarının belirlenmesi, banka şubelerinden para toplanması/dağıtılması, evlere yakıt dağıtımı, atık suların arıtılarak çamurun ayrılması, çöp toplama hizmetleri, marketlere/bakkallara dağıtılan içecek miktarları, benzin istasyonlarına yakıt ikmali, insani yardım lojistiği vb. STARP'ye örnek olarak verilebilir [14].

Gerçek hayatta karşımıza çıkan problemler incelendiğinde, problemde yer alan parametrelerin her zaman deterministik olmadığı, çoğu durumda stokastik bilgi içerdiği görülmektedir. Böyle bir durumla karşılaşıldığında, problemin matematiksel modeli doğrusal programlama yaklaşımı ile oluşturulamamaktadır. Stokastik bilgi içeren problemlerin matematiksel modelinin oluşturulmasında stokastik programlama yaklaşımı kullanılmaktadır. Literatürdeki STARP konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, matematiksel modelin oluşturulmasında Şans Kısıtlı Programlama (Chance Constraint Stochastic Programming, CCP) ve Yardımcı Eylemli Stokastik Programlama (Stochastic Programming with Recourse, SPR) yaklaşımlarının kullanıldığı tespit edilmiştir [15].

Şans kısıtlı programlama yaklaşımı

Şans kısıtlı programlama (CCP), bir problemin belirsizliğiyle başa çıkmak için geliştirilen bir yaklaşımdır ve literatüre ilk kez Charnes ve Cooper tarafından 1962 yılında yaptıkları çalışmalar ile kazandırılmıştır. Araştırmacılar, yaptıkları çalışmalarda, stokastik durum içeren değişkenleri geliştirdikleri CCP yaklaşımıyla modellemeye çalışmışlardır [16,17]. CCP tekniğinin temel amacı, olasılık kısıtlarının deterministik eş değerlerinin belirlenmesidir [18]. CCP yaklaşımı, stokastik bilgi içeren değişkenlerin yer aldığı kısıtlarda ve amaç fonksiyonunda, bilinen olasılık dağılımına sahip değişkenlerin mümkün olduğu şekilde deterministik hale dönüştürülmesidir. CCP yaklaşımında, rota kırılma olasılığının belirli bir seviyenin altında olduğu kabul edilmekte ve rota kırılma maliyetleri genelde göz ardı edilmektedir [15]. Olasılık kısıtlarına bağlı olacak şekilde kısıtı en büyükleyecek dağılımların belirlenmesi ve stokastik bilgi içeren rastgele değişkenlerin mümkün olduğunca, önceden belirlenmiş olan dağılımlara yaklaştırılabilmesi, CCP yaklaşımının iki önemli unsurunu oluşturmaktadır [18]. Stokastik bilgi içeren rastgele değişkenler ise genel olarak normal dağılıma sahiptir [1,14,18]. CCP yaklaşımı $Pr(Ax \leq b)$ olarak ifade edilebilir. Bu formülasyon ile $Ax \leq b$ kısıtının gerçekleşme olasılığının, olasılık değerini gösteren α değerinden daha yüksek olması gerektiği ifade edilmektedir [18]. CCP

yaklaşımında, stokastik bilginin yer aldığı deterministik kısıtlar, bu bilgi kullanılarak oluşturulan stokastik kısıt kümesi ile değiştirilmektedir. Bu yaklaşım ile belirlenen olasılık düzeyinde, stokastik bilgi içeren bazı kısıtların aşılmasına izin verilmektedir.

Yardımcı eylemli stokastik programlama

Stokastik bilginin yer aldığı problemlerin matematiksel modelinin oluşturulmasında kullanılan, yardımcı eylemli stokastik programlama (SPR) yaklaşımında, rota kırılmasına izin verilmektedir. Ancak rota kırılması meydana geldikten sonra, rotanın yeniden belirlenebilmesi için karar verici, hangi yardımcı eylem politikasının kullanılması gerektiği hakkında karar vermek zorundadır. SPR yaklaşımıyla oluşturulan modelin çözümü, CCP yaklaşımına göre daha zordur [19].

CCP yaklaşımıyla oluşturulan modellerde ortaya çıkan maliyetin modele kesin bir şekilde yansıtılamamasından dolayı araştırmacılar SPR yaklaşımını geliştirmişlerdir. SPR yaklaşımında, maliyetin hesaplanmasında yardımcı eylemlerin oluşturacağı beklenen maliyet ile planlanan rotanın beklenen maliyeti birlikte ele alınmaktadır [14].

SPR yaklaşımında yaygın olarak kullanılan 3 çeşit yardımcı eylem bulunmaktadır:

1. Müşteri talepleri karşılanamadığında veya rotada hareketine devam eden aracın kapasitesi aşıldığında, araç boşaltma veya yükleme işlemini gerçekleştirmek için depoya geri döner. Daha sonra araç, rotaya, rota kırılmasının ortaya çıktığı son müşteriden itibaren devam eder. Literatürde bu yaklaşım, Depoya Geri Dönüş yardımcı eylemi olarak bilinmektedir.
2. Araç rota kırılmasına maruz kalmadan önce tedbir olarak, depoya giderek, araca yükleme işlemini gerçekleştirebilir.
3. Aracın rotasında, müşteriye hizmet verildikten sonra veya rota kırılması meydana geldikten sonra, mevcut rota, hizmet verilmemiş olan müşterileri de dikkate alacak şekilde yeniden optimize edilir. Hangi müşterinin daha sonra ziyaret edilmesiyle ilgili olarak verilen karar, araca yeniden yükleme yapmak için veya düzenlenen rotanın belirli bir parçasıyla devam etmek için depoya dönmesi şeklinde olabilir [15].

2.2.2. STARP için literatür taraması

Araştırmacılar STARP ile ilgili araştırmalarında özellikle iki konu üzerine yoğunlaşmışlardır. Bunlardan ilki, STARP için ilgili varsayımları dikkate alarak matematiksel programlama modelinin geliştirilmesidir. İkincisi ise, incelenen NP-zor özellikteki STARP'nin kısıtlarını dikkate alan çözüm algoritmalarının geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalarda, genellikle literatürde yer alan matematiksel modellerin kullanıldığı ve model önerisinde bulunulmadığı tespit edilmiştir. Problemin çözülmesi için ise araştırmacılar genellikle sezgisel ve metasezgisel yöntemler ile bunların üstün yanlarını içerecek şekilde oluşturan hibrit algoritmaları kullanmışlardır [17].

STARP'nin özellikle son yıllarda araştırmacıların dikkatini çeken bir konu haline geldiği görülmektedir. Desticioğlu ve Özyörük yaptıkları çalışmada STARP konusundaki çalışmalar hakkında ayrıntılı bir literatür taramasına yer vermişlerdir [20]. Bu bölümde STARP konusunda yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

Bertsimas, STARP'yi incelediği çalışmasında, bütün potansiyel müşterilerin önce rotasının belirlenmesi gerektiğini, daha sonra ise müşterilerin stokastik talep bilgilerine göre 2 strateji kullanarak rotanın yeniden oluşturulması gerektiğini belirtmiştir. İlk ve yeniden optimizasyon stratejileri ile söz konusu problemi çözmeye çalışmış ve çözüm için kullanılan iki algoritmanın performanslarını karşılaştırmıştır [21].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde STARP'nin matematiksel modelinin geliştirilmesi için genelde SPR yaklaşımının kullanıldığı görülmektedir. Dror, Laporte ve Trudeau, yaptıkları çalışmada problemi, stokastik çok aşamalı programlama problemi olarak incelemişler ve problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Araç rota üzerinde hareketine devam ederken, araç üzerinde müşterinin talebini karşılayacak kadar malzeme bulunmuyorsa, araç depoya dönerek yükleme yaptıktan sonra rotasına talebini karşılayamadığı müşteriden devam etmektedir. Araştırmacılar bu problemin modellenen oluşturulmasında Markov karar zincirlerinden faydalanmışlardır [22]. Dror çalışmasında SPR yaklaşımını kullanarak STARP'yi matematiksel modelini oluşturmuştur. Oluşturulan matematiksel modelin çözümünün Hamilton Çevrimini karşıladığını göstermiştir. Ayrıca, modelin çözümüyle elde ettiği sonuçların karşılaştırılabilmesi için Markov karar modelini kullanmıştır [23].

Laporte, Louveaux ve Van Hamme STARP'yi modellemek için depoya geri dönüş yardımcı eylemli SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada taleplerin poisson ve normal olmak üzere 2 çeşit dağılıma sahip olduğunu varsaymışlar ve matematiksel modelin oluşturulmasında her iki dağılımı da dikkate almışlardır. Problemin çözümü için kesin çözüm veren tam sayılı L-Shaped algoritmasını kullanmışlardır [24]. Goodson, Ohlmann ve Thomas tarafından yapılan çalışmada da, STARP'nin modellenmesinde depoya geri dönüş yardımcı eylemi kullanılmıştır. Problemin çözümünde araçların en iyi rotalarının belirlenebilmesi için, daha önce belirlenmiş rotalar kullanılarak yeni durum için rotaların alt turlarını oluşturmuşlardır [25]. Juan ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada STARP'nin matematiksel modelini depoya geri dönüş yardımcı eylemli SPR yaklaşımı ile oluşturmuşlardır. Modellemede araç kapasitesinin belirli bir yüzdesini güvenlik stoğu olarak araçta bulunduran bir yaklaşım kullanmışlardır [26]. STARP'nin matematiksel modelini depoya geri dönüş yardımcı eylemini kullanarak oluşturan bir diğer çalışma ise Zho, Rousseau ve Rei tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar oluşturdukları matematiksel modele rotaların parçalı optimizasyonunu da ekleyerek çözmeye çalışmışlardır [27].

Yang STARP'yi incelediği çalışmasında, problemi tek araçlı ve çok araçlı olarak ele almış ve problemin matematiksel modelini SPR yaklaşımıyla oluşturmuştur. Modelde yardımcı eylem olarak koruyucu stoklama politikası kullanılmıştır [28]. STARP'nin modellenmesinde benzer yardımcı eylemi kullanan bir başka çalışma ise Biesinger, Hu ve Raidl tarafından yapılmıştır. Kullandıkları yaklaşıma göre araç rotada müşterilere hizmet verirken stoksuz kalmadan önce yeniden yükleme yapmak amacıyla depoya dönmektedir. Araştırmacılar inceledikleri problemin çözümü için ise Tam Sayılı L-Shaped algoritmasına dayanan bir yaklaşım kullanmışlardır [29].

Jabali, Rei, Gendreau ve Laporte tarafından yapılan çalışmada STARP'nin modellenmesi için iki aşamalı SPR yaklaşımı kullanılmıştır. Söz konusu problemde rota kırılması sonucu oluşacak maliyet ile planlanan rota maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için ise L-shaped algoritmasını kullanılmıştır [30].

Dror çalışmasında, STARP'yi modellemek için farklı yardımcı eylemler içeren stokastik programlama yaklaşımlarını kullanmıştır. Araç kapasitesi belirli olmak şartıyla, rota devam ederken müşteri talebi karşılanamadığında rota kırılması meydana geldiğini ve aracın depoya dönerek yükleme yaptığını varsayan yardımcı eylemini kullanarak problemin

matematiksel modelini geliştirmiştir. Amaç araç filosu maliyeti ile rotada yer alan müşterilerin talebini karşılamak için katlanılan maliyetin minimize edilmesidir [31].

Ak ve Erera yaptıkları çalışmada STARP için çift araçlı yardımcı eylem olarak adlandırılan yeni bir yardımcı eylem geliştirmişlerdir. Bu stratejiye göre, eğer müşterilerin talepleri aracın kapasitesini aşarsa, kapasitenin aşılması nedeniyle talebi karşılanamayan müşterilerin talebi başka bir araç tarafından karşılanır. Bu aracın önceden belirlenen rotasında yer alan müşterilere hizmet verdikten sonra, araca diğeri aracın müşterilerinin eklendiğı ve buna göre aracın rotasının güncellendiğı varsayılmıştır [32].

STARP'nin matematiksel modelini oluşturmak için SPR yaklaşımını kullanan bir başka alışma Laporte ve Loveaux tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar STARP için geliştirdikleri modelde koruyucu dönüş turlarını yardımcı eylem olarak almışlardır. Küçük boyuttaki problemlerin çözümünde alt-üst sınırların belirlenmesi ve oluşturulan matematiksel modeli çözmek için kesin çözüm bulan yaklaşımları kullanmışlardır [33].

STARP konusunda literatürde yer alan bazı çalışmalarda ise SPR yaklaşımıyla matematiksel modelin oluşturulmasının yanında, büyük boyuttaki problemleri de makul sürede çözebilecek sezgisel ve metasezgisel çözüm yöntemlerinin geliştirildiğı tespit edilmiştir. Yang, Mathur ve Ballou yaptıkları çalışmada tek araçlı ve çok araçlı STARP'yi incelemişler ve problemlerin matematiksel modelinin oluşturulması için, SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Matematiksel modelde yardımcı eylem olarak, depoda araç kalmadığında, aracın depoya geri dönerek yeniden yükleme yapılması yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada toplam maliyetin minimize edilmesi amacı dikkate alınarak araçların rotasını belirleyecek sezgisel çözüm yöntemleri geliştirilmiştir [34].

Gauvin, Desaulniers ve Gendreau yaptıkları çalışmada söz konusu probleme yeni kısıtlar eklemişler ve problemi modellemek için SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Modelin oluşturulmasında depoya geri dönüş yardımcı eylemini kullanmışlardır. Müşteri taleplerini karşılayan araçların rotalarının oluşturulması için dinamik programlama yaklaşımını kullanmışlardır [35]. Louveaux ve Salazar-Gonzalez tarafından yapılan çalışmada da, araç kapasitesi aşıldığında depoya geri dönüş yardımcı eylemi kullanılmıştır. İncelenen problemde araçlara müşteri taleplerini karşılayamadıklarında, yükleme/boşaltma için depoya geri dönüş yapmasına izin verilmektedir. Modelde araçların depolara yaptıkları

geri dönüş sayısını azaltmak için ise araçların depolara koruyucu geri dönüşler yapabileceklerini varsaymışlardır. Modeli çözmek için, L-shaped algoritmasını baz alan dal-kesme yaklaşımını geliştirmişlerdir [36].

Depoya geri dönüş yardımcı eylemini kullanan daha güncel bir çalışma Hernandez ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada, STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulmasında iki aşamalı SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Rota devam ederken müşteri taleplerini karşılayan aracın kapasitesi aşıldığında rota kırılması oluştuğunu varsaymışlar ve bu durumda aracın depoya geri dönerek yükleme/boşaltma yaptığını ve aracın rotasına, kırılmanın meydana geldiği müşterinin talebini karşılayarak devam ettiğini varsaymışlardır. Araştırmacılar inceledikleri problemi çözmek için Yerel Dallanma Metasezgisel yaklaşımını geliştirmişlerdir [37].

Ismail ve Irhamah STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulması için koruyucu stoklama politikası yardımcı eylemini kullanmışlardır. Problemin çözümü için ise Tabu Arama ile Genetik Algoritma yaklaşımlarını birleştiren hibrit bir sezgisel önermişlerdir. [38]. Biesinger, Hu ve Raidl de yaptıkları iki farklı çalışmada, STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulması için koruyucu stoklama politikasını dikkate alan SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Problemi çözmek için ise değişken komşu arama yaklaşımına dayanan bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Araştırmacılar diğer bir çalışmada ise, benzer problemi çözmek için genetik algoritmaya dayanan bir metasezgisel kullanmışlardır [39, 40].

Marinakos, Iordanidou ve Marinaki, STARP'yi yeniden yükleme yardımcı eylemini içeren SPR yaklaşımıyla modellemişlerdir. Araştırmacılar matematiksel modeli oluştururken rota kırılmasına izin vermemiş olup, rotada hizmet veren araçların yükleme miktarı için bir eşik değeri belirlemişlerdir. Eğer rotada müşterilerin taleplerini karşılayan araçtaki yükleme miktarı bu değerin altına inerse, aracın yeniden yükleme için depoya gideceğini varsaymışlardır. Problemi çözmek için Parçacık Sürü Optimizasyonuna dayanan bir yaklaşım önermişlerdir [41].

Pasha, Hoff ve Hvattum tarafından yapılan çalışmada, farklı kapasitedeki araçların yer aldığı çok dönemli STARP incelenmiştir. Bu problemde amaç, rota maliyeti, araç edinme maliyeti ile rota kırılmasından meydana gelen beklenen maliyetlerin toplamının en küçüklenmesidir. Araç müşterilere hizmet verirken eğer müşterinin talebini karşılayacak

miktarda ürün yoksa rota kırılmasının meydana geldiğini ve aracın yükleme için depoya gittiğini kabul etmişlerdir. Bu varsayımları dikkate alarak problemin matematiksel modelini karışık tam sayılı programlama ile oluşturmuşlar ve problemi çözmek için sezgisel bir yaklaşım önermişlerdir [42].

Teodorovi’c ve Pavkovi’c, STARP’nin matematiksel modelini oluşturmak için SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Oluşturulan matematiksel modelde en fazla bir rota kırılmasının meydana gelebileceğini varsaymışlardır. Araştırmacılar inceledikleri problemi, tavlama benzetimini kullanarak çözmüşlerdir [43].

Haugland, Ho ve Laporte tarafından yapılan çalışmada ise STARP’de araç kısıtları dikkate alınmıştır. Araştırmacılar problemin matematiksel modelini oluşturmak için SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Çok Başlangıçlı Sezgisel ile Tabu Aramayı birleştiren bir yaklaşımı problemin çözümü için kullanmışlardır [44].

Lojistik hizmetlerinde karşılaşılan 2 aşamalı STARP Wang, Lan ve Zhao tarafından ele alınmış olup, araştırmacılar söz konusu problemin matematiksel modelini SPR yaklaşımıyla oluşturmuşlardır. Amaç rota kırılması sonucu ortaya çıkan maliyetler ile seyahat maliyetleri toplamının minimize edilmesidir. Araştırmacılar inceledikleri problemi genetik algoritmayı kullanarak çözmüşlerdir [45].

STARP’nin matematiksel modelinin oluşturulmasında SPR yaklaşımını kullanan bir çalışma Salavati-Khoshgahalb ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, araç rotasına devam ederken herhangi bir noktada aracın kapasitesi aşıldığında rota kırılmasının olduğu varsayılmıştır. Araçlar müşterilere hizmet verirken rota kırılması meydana geldiğinde uygun yardımcı eylemler kullanarak yeni rotalar oluşturulmaya çalışılmıştır. Dikkate alınacak operasyonel kuralları belirlemek ve oluşturulan rotalarda bu operasyonel kuralları hayata geçirmek için sabit eşik temelli bir strateji uygulamışlardır. Araştırmacılar başka bir çalışmada ise, STARP’de müşteri taleplerindeki belirsizlik nedeniyle araç kapasitesi aşıldığı zaman rota kırılmasının ortaya çıktığını varsaymışlardır. Problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında yardımcı eylem olarak optimal yeniden yükleme yaklaşımını kullanmışlardır. Problemi tam sayılı L-shaped algoritmasını, dal-kesme algoritmasıyla uyarlayarak çözmüşlerdir. Aynı yıl yaptıkları başka bir çalışmada ise, STARP’nin matematiksel modelini oluşturmak için optimal yeniden yükleme ile depoya

geri dönüş yardımcı eylemlerini birleştiren yeni bir yardımcı eylem kullanmışlardır. Hibrit yardımcı eylem politikası altında kesin çözüm bulabilen bir algoritma geliştirerek problemin çözümünde kullanmışlardır [46-48]

STARP'nin modellenmesi için kullanılan diğer bir yaklaşım ise CCP yaklaşımıdır. Çok bölmeli STARP'yi inceleyen Mendoza ve arkadaşları, problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında CCP yaklaşımından faydalanmışlardır. Memetik algoritma ile yerel arama prosedürünü birleştiren hibrit yaklaşım ile problemi çözmüşlerdir [49]. Baykoç ve İşleyen de yaptıkları çalışmada, çok aracın yer aldığı STARP'yi incelemişler ve problem için CCP yaklaşımını kullanarak problemin modelini geliştirmişlerdir. Çalışmada modeli doğrusal hale dönüştürdükten sonra çözmüşlerdir [50]. STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulması için CCP yaklaşımını kullanan güncel bir çalışma, Dinh, Fukasawa ve Luedtka tarafından yapılmıştır. Problemin matematiksel modeli oluşturulurken, problemde her aracın kapasitesinin aşılması olasılığına sınırlama getirilmiştir. Dal-kesme ve fiyat algoritması problemi çözmek için kullanılmıştır [51].

Literatürdeki bazı çalışmalar da, STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulmasında bazen de SPR ve CCP yaklaşımlarının birlikte kullanıldığı tespit edilmiştir. Dror ve Trudeau, STARP'nin matematiksel modelini önce CCP yaklaşımı ile sonrasında ise SPR yaklaşımı ile oluşturmuşlardır. Rota kırılması meydana geldiğinde kırılma anındaki müşteri ile talebi karşılanmayan kalan müşterilere hizmet verilmesini yardımcı eylem olarak kullanmışlardır. Araştırmacılar inceledikleri problemi, tasarruf algoritmasına dayanan bir yaklaşım ile çözmüşlerdir [52]. Stewart ve Golden de STARP'nin matematiksel modelini CCP ve SPR yaklaşımlarını birlikte kullanarak oluşturmuşlardır. Geliştirilen matematiksel modelde k rotasında meydana gelen her bir rota kırılması için sabit ceza katsayısı ile araç müşteri taleplerini karşılayarak rotasına devam ederken, müşteri taleplerinin belirsizliğinden dolayı herhangi bir noktada araç kapasitesi aşıldığında a birim talep için ceza katsayısını yardımcı eylem olarak dikkate almışlardır. Lagrange çarpanlarını kullanarak küçük boyutlu problemler için optimal çözümü bulmuşlardır. Büyük boyuttaki problemleri çözebilmek için ise tasarruf algoritmasına dayanan bir yaklaşım geliştirmişlerdir [53]. Problemin matematiksel modelini oluşturmak için iki yaklaşımı birlikte kullanan diğer bir çalışma ise Laporte, Louveaux ve Mercury tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar önce CCP ile geliştirdikleri modeli deterministik hale getirmeye

çalışmışlar, sonrasında ise SPR yaklaşımını kullanarak rotadaki araçların beklenen maliyeti minimize etmeyi amaçlamışlardır [54].

Dror, Laporte ve Louveaux tarafından yapılan çalışmada STARP'nin önce CCP yaklaşımı ile matematiksel modeli oluşturulmuş ve problem kesin çözüm yöntemleri ile çözülmüştür. Sonrasında ise çalışmada STARP'nin matematiksel modelini araç rotada müşterilere hizmet verirken yalnız bir kere rota kırılmasına izin verilebileceği yardımcı eylemini kullanan SPR yaklaşımı ile geliştirmişlerdir. Modeli Gezgin Satıcı Problemine (GSP) benzeterek çözmeye çalışmışlardır [55]. Bastian ve Kan STARP'ye daha gerçekçi bir matematiksel modelin oluşturulması için CCP ve SPR yaklaşımlarını birlikte kullandıklarını belirtmişlerdir. Araştırmacılar modeli çözmek için Tasarruf Algoritmasını kullanmışlardır [56].

Bertsimas, Chervi ve Peterson, Olasılıklı GSP ile Olasılıklı ARP'yi inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada problemlerin çözümü için Öklid düzlem versiyonlarını ve talepler gerçekleşmeden rotaları tasarlayan grafik tabanlı öncül sezgisel yaklaşıma dayanan bir çözüm yöntemi önermişlerdir [57].

Tang, Ong ve Huang yaptıkları çalışmada STARP'nin çözümü için aynı komşuluk yapılarından oluşturulan Tavlama Benzetimi, Tabu Arama ve Eşik Kabul yöntemlerini kullanmışlar ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları hesaplamalarda en iyi sonuçların Tabu Arama ile elde edildiğini tespit etmişlerdir [58].

Bianchi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, aracın beklenen seyahat mesafesini minimize edecek müşteri rotalarını oluşturmaya çalışan STARP incelenmiştir. Araştırmacılar, sezgisel ve metasezgisel yöntemleri kullanarak problemi çözmüşlerdir [59].

Moghaddam, Ruiz ve Sadjadi, yaptıkları çalışmada STARP'yi Kuş Sürüsü Algoritmasını kullanarak çözmeye çalışmışlar ve gerçek hayat problemleri üzerinde inceleme yaparak bulunan sonuçların optimuma çok yakın olduğunu göstermişlerdir [60]. Mendoza ve Villegas yaptıkları çalışmada STARP'nin çözümü için bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Geliştirdikleri algorithmada örneklem içi bir dizi alt bölümler oluşturma formülasyonu ile tur bölümler stratejilerini kullanarak uygun çözüm bölgesini belirlemişlerdir [61].

Juan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, STARP'yi çözmek için Paralel & Dağıtılmış Hesaplama Sistemleri yöntemi geliştirilmiştir. Bu yaklaşım müşteri taleplerinin stokastik olmasından dolayı ortaya çıkan belirsizliği, emniyet stokları ile karşılamaya çalışan bir yaklaşıma dayanmaktadır, yani müşteri taleplerini gerçekleştiren araçların rotaları oluşturulurken, araç kapasitesinin önceden belirlenmiş olan bir kısmında müşteri talepleriyle başa çıkabilmek için emniyet stoku tutulmaktadır [62].

Marinakis, Marinaki ve Spanou, yaptıkları çalışmada Memetik Diferansiyel Evrim Algoritmasını kullanarak STARP'yi çözmeye çalışmışlardır. Önerilen algoritmanın daha etkili çözümler bulabilmesi için, değişken komşu yöntemiyle birlikte kullanan hibrit bir yaklaşım kullanmışlardır [63].

Calvet ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, mesafelerin asimetrik olduğu heterojen araç filolu STARP'yi incelemişler ve problemi ardışık yaklaşımlar yöntemine dayanan simheuristik yaklaşımı ile çözmüşlerdir [64].

Müşteri taleplerinin dinamik ve stokastik olduğu ARP, Saransola ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Problemde dinamik talepler daha önce rotada yer almayan müşterilerden gelen taleplerden oluşmaktadır. Stokastik talepler ise araç müşterinin bulunduğu noktaya ulaştığında kesin olarak öğrenilmektedir. Araştırmacılar inceledikleri problemleri çözmek için dinamik durumlara ve stokastik senaryolara uyum sağlayabilecek özellikte olan değişken komşu arama algoritmasına dayanan bir yaklaşım kullanmışlardır [65].

Marinaki ve Marinakis ise STARP'nin çözümü için ateşböceği sürüsü optimizasyonu algoritmasını kullanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, bu yaklaşımı kullanarak buldukları sonuçları, literatürde yer alan diğer sezgisel yöntemlerle karşılaştırarak daha iyi sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir [66].

Müşteri taleplerinin bulanık olduğu ARP Liu, Kou ve Huang tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar problemin matematiksel modelini bulanık kısıtlar altında oluşturmuşlar ve hibrit karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasını kullanarak problemi çözmüşlerdir [67]. Luo ve arkadaşları dinamik programlamaya dayanan öncelikli optimizasyonu kullanarak STARP'yi çözerek rotanın beklenen maliyetini hesaplamışlardır. Orta ve büyük boyuttaki

problemlere iyi çözümler bulabilmek için uyarlamalı geniş komşu arama sezgiselini kullanmışlardır [68].

Subramanyam, Repoussis ve Gounaris ise heterojen filolu STARP üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar problemi çözmek için, komşu değişimi hareketleri ile klasik düğüm hareketlerini içeren komşu arama algoritmasını kullanmışlardır [69].

Florio, Hartl ve Minner tarafından yapılan çalışmada optimal yeniden yüklemeli STARP incelenmiştir. Problemin çözümü için dal-fiyat-kesme algoritmasını geliştirmişler, etiketleme prosedürünü kullanılarak birden fazla aracın ortaya çıktığı durumlarda araçlar için en uygun rotaları belirlemişlerdir [70].

Gutierrez ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, STARP'yi çözmek için, Açgözlü Rassal Uyarlamalı Arama Prosedürü (GRASP) ile memetik algoritma birleştiren hibrit bir algoritma önermişlerdir [71].

Festa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada STARP'yi çözmek için, GRASP ile iki aşamalı Monte Carlo simülasyonunu birleştiren hibrit bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmada, ilk aşamada, simülasyon sonucunda bulunan optimum çözüm kümeleri oluşturulmaktadır. Sonraki aşamada ise, simülasyonda elde edilen en iyi sonuçlar alınarak en güvenilir çözümler bulunmaktadır. Algoritmada elde edilen en iyi çözüm ise, problemin nihai çözümü olarak alınmaktadır [72].

Arvianto ve arkadaşları, STARP'yi 0-1 yer değiştirme tekniğine dayanan sıralı ekleme yaklaşımını kullanarak çözmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar problemi çözmek için simülasyon tekniğini kullanmışlardır [73].

Süre kısıtını dikkate alan STARP'nin de araştırmacılar tarafından yaygın çalışılan bir konu olduğu dikkat çekmektedir. Erera, Monales ve Savelsbergh, müşterilerin taleplerinin gerçekleşmesi için tur süresinin uygulanabilir olduğu STARP'yi incelemişlerdir. Geliştirdikleri süre kısıtlı STARP'nin matematiksel modelini SPR yaklaşımını kullanarak oluşturmuşlardır. Araçların rotalarında bölünemeyen rotalarla karşılaşıldığında depoya geri dönülmesini yardımcı eylem olarak almışlardır [74]. Mendoza, Rousseau ve Villegas tarafından yapılan çalışmada da süre kısıtlı STARP ele alınmıştır. Bu çalışmada, problemin

matematiksel modeli hem CCP yaklaşımı ile hem de SRP yaklaşımı ile iki aşamalı olarak oluşturulmuştur. İlk aşamada amaç, toplam rota süresinin belirlenmiş olan eşik değerinden daha küçük olması şeklinde alınmıştır. İkinci aşamada ise eşik değeri aşıldığı zaman amaç fonksiyonuna ceza değişkeni eklenmektedir. Oluşturulan matematiksel modelde, rotadaki beklenen toplam gecikmenin minimize edilmesi amaçlanmaktadır [75]. Benzer problem Goodson, Thomas ve Ohlmann tarafından da ele alınmış ve müşterilere hizmet veren araçlar için uygun rotaları belirleyecek yeniden yükleme yardımcı eylemli Rollout algoritmasını kullanmışlardır. Oluşturulan sabit rotada, optimal yeniden stoklama miktarını bulabilecek bir algoritma önermişlerdir [76]. Mendoza, Rousseau ve Villegas ise yaptıkları çalışmada, süre kısıtlı STARP'yi çözebilecek iki strateji geliştirmişlerdir. İlk stratejide, süre kısıtları CCP yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmış, maksimum sürenin aşılma olasılığının belirlenen eşik değerinden daha küçük olacağı varsayılmıştır. İkinci stratejide ise, süre kısıtı aşıldığında amaç fonksiyonuna bir ceza değişkeni eklenmiştir. GRASP'a dayanan bir yaklaşımı problemlerin çözümü için kullanmışlardır [77].

Araçların çok bölmeli özellikte olduğu süre kısıtlı STARP Goodson tarafından incelenmiştir. Problemi çözmek için beklenen maliyeti hesaplayabilecek özellikte olan tavlama benzetimindeki döngü sıralamasına dayanan bir yöntem geliştirilmiştir [78].

Belirli bir zaman diliminde hizmet verilen müşteri sayısının maksimize edilmesi amacını dikkate alan STARP Ulmer ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada, araçların müşteri taleplerini karşılayacak şekilde uygun rotaların belirlenmesi için rollout algoritmasını kullanmışlardır [79].

Sungur, Orderez ve Dessouky tarafından yapılan çalışmada sınırlı bir belirsizlik kümesine ait taleplerin robust özellikte olduğu varsayılarak, problem için uygun çözümler bulunmuştur. Tüm belirsiz parametrelerin en kötü değeri aldığı zaman da amaç fonksiyonunu optimize eden rotanın belirlenmesini Robust ARP için uygun çözüm olarak almışlardır [80]. Gournais, Wiesemann ve Floudas tarafından yapılan çalışmada ise Robust STARP'nin bir başka şekli ele alınmıştır. Yapılan çalışmada, müşteri taleplerinin olasılık dağılımlarının bilinmediği fakat taleplerin olası gerçekleşme durumlarının bilindiği kabul edilmiştir. Problemin matematiksel modeli Miller Tucker-Zemlin'den elde edilen öncelik formülasyonuna göre oluşturulmuştur [81].

Müşterilerin ve müşteri taleplerinin her ikisinin de stokastik olduğu ARP Gendreau, Laporte ve Seguin tarafından çalışılmıştır. Araştırmacılar problemin modelini oluşturmalar ve modelin çözümü için küçük boyutlu problemlerde kesin çözüm bulan tam sayılı L-Shaped algoritmasını önermişlerdir [82].

Tan, Cheong ve Goh tarafından yapılan çalışmada zaman kısıtları ile araç kapasitesinin aşılmasının engellenmesi kısıtları altında, araç sayısı, sürücü ücreti ile seyahat mesafesinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada problemin çözümü için rota simülasyonuna dayanan çok amaçlı evrimsel algoritma yaklaşımı kullanılmıştır [83].

Tek araçlı STARP Jaillet ve Odoni tarafından incelenmiş olup, inceledikleri problemde müşteri taleplerinin ya 0 ya da 1 olduğunu kabul etmişlerdir. Çalışmada bu problem türü için optimal çözüm bulunamayacağını belirtmişlerdir [84]. Benzer problem Hjorring ve Holt tarafından incelenmiş ve matematiksel modelin oluşturulmasında depoya geri gidiş yardımcı eylemini içeren SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Bu çalışmada, rotada araç tarafından müşterilere hizmet verilirken karşılaşılabilecek stok tükenmesini iki şekilde incelemişlerdir. İlk olarak, müşteri talebinin araçtaki kapasiteyle karşılanamadığı, normal stok tükenmesi durumu olarak incelemişlerdir. Böyle bir rota kırılması ortaya çıktığı zaman araç yeniden yükleme için depoya döner ve müşteri talebini karşılayamadığı müşteriden rotasına başlayarak kalan müşterilere hizmet verecek şekilde rotasını oluşturur. Diğerisi ise aracın belirli müşterilerin talebini karşılayacak kadar ürüne sahip olduğu kesin stok tükenmesi durumudur. Bu durumda araç, en son ziyaret ettiği müşterinin talebini tam olarak karşıladıktan sonra depoya üzerindeki yükü tamamen dağıtmış şekilde boş bir olarak dönmektedir. Yeniden yükleme için araç depoya dönüp yükleme işlemini tamamladıktan sonra araç rotasına daha önce dağıtım yapmadığı müşterilerden başlayarak devam etmektedir [85]. Secomandi benzer problemin matematiksel modelini oluşturmak için, her rota kırılması meydana geldikten sonra rotanın yeniden optimize edilmesi yardımcı eylemini içeren bir yaklaşım kullanmıştır. Bu yaklaşım ile koruyucu stoklama politikasına göre daha iyi sonuçlar elde edildiğini, ancak bu yöntem daha yavaş çözüm bulunabildiğini belirtmiştir [86]. Secomandi, benzer problemi incelediği bir diğer çalışmada, taleplerin kesikli dağılıma sahip olduğunu varsaymıştır. Problemin matematiksel modelini depoya geri dönüş yardımcı eylemli stokastik programlama ile geliştirmiştir [87].

Bianchi ve arkadaşları tek araçlı STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulmasında koruyucu yeniden yükleme içeren SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Bu problemde, rota kırılması meydana gelmese bile müşteri talebini karşılayacak şekilde yeniden yükleme için aracın depoya geri gidişine izin verildiğini kabul etmişlerdir [88].

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda ise dinamik programlama yaklaşımının kullanıldığı görülmektedir. Novoa ve Storer, tek araçlı STARP'nin maliyet hesabını yapabilmek için iki aşamalı Rollout Algoritması ile Monte Carlo Benzetimini birlikte kullanmışlardır. Çözüm için uygulanan algoritmalar sonucunda bulunan çözümler ve hesaplama zamanlarında önemli derecede iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [89]. Benzer problemin çözümü için Monte Carlo benzetimini kullanan bir diğer çalışma ise Rei, Gendreau ve Soriano tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında, yardımcı eylem olarak ise depoya geri dönüş eylemi kullanılmıştır [90]. Zhang ve arkadaşları ise benzer problemin çözümü için değer fonksiyonunu kullanan dinamik programlamaya dayanan bir yaklaşım kullanmıştır [91].

Kyriakidis ve Dimitrakos, müşteri taleplerinin bilinen bir dağılıma sahip olduğu, rotaya bir depodan başlayan ve n adet müşteriye belirli bir sırayla hizmet verdikten sonra depoya dönen aracın optimal rotasını belirleyecek problemi incelemiştir. Çalışmada aracın yeniden yükleme için depoya geri dönebileceğini varsayımı altında matematiksel model oluşturulmuş ve problemi çözmek için dinamik programlama yaklaşımı kullanılmıştır [92].

Tek araçlı STARP'yi inceleyen Secomandi ve Margot ise problemi çözmek için parçalı yeniden optimizasyon çözüm yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda araçların rotası çoklu aşamadan oluşturulmakta ve araçların rotaları boyunca yer alan tüm müşterilerin taleplerinin karşılanması amaçlanmaktadır. Ziyaret edilmemiş müşteriler kümesi ile kalan araç kapasitesini dikkate alarak aracın rotası her bir aşamadan sonra yeniden optimize edilmeye çalışılmaktadır [93].

Stokastik talep ile stokastik müşterilerin birlikte ele alındığı ARP Balaprakash ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar inceledikleri problemi çözebilmek için yapay tahmin yaklaşımına dayanan bir sezgisel kullanmıştır [94].

Florio, Hartl ve Minner çalışmalarında tek araçlı STARP için optimum yüklemeyi içeren bir matematiksel model önerisinde bulunmuş ve modelde müşteri taleplerinin kesikli olasılık dağılımına sahip olduğu varsayımı altında Markov karar prosesini kullanmıştır. Problemin matematiksel modelini, karışık tam sayılı doğrusal programlama modeline dönüştürmüşler ve küçük boyuttaki problemler için optimal çözümü elde etmişlerdir [95].

Bertazzi ve Secomandi, tek araçlı STARP'yi çözmek için rollout algoritmasını kullanmıştır. Hesaplama süresini azaltmak için, herhangi bir rollout algoritmasını çalıştırırken aynı zamanda rota maliyetini de tahmin eden bir yaklaşım önermişlerdir [96].

Zaman Pencereli Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi (ZP_STARP) ilk olarak Ong ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada ZP_STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulması için CCP yaklaşımı kullanılmıştır. Araştırmacılar problemi çözmek için seçim kriterli sıralamaya dayanan bir algoritma geliştirmişlerdir [97].

Literatürde ZP_STARP konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde problemin matematiksel modelinin genelde SPR yaklaşımıyla oluşturulduğu görülmektedir. Chang yaptığı çalışmada ZP_STARP'nin matematiksel modelini oluşturmada kesin stok tükenmesi ile aracın kapasitesinin aşılması yardımcı eylemlerini dikkate alan SPR yaklaşımından faydalanmıştır [98]. Erera, Monales ve Savelsberg ise ZP_STARP'nin matematiksel modelini, depoya geri dönüş yardımcı eylemini içeren SPR ile geliştirmiştir. Eğer rotaya devam eden araç bir müşterinin talebini karşılayamazsa, aracın yeniden yükleme için depoya gideceğini varsaymışlardır [99]. Lei, Laporte ve Guo da ZP_STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulmasında SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Problemde, müşteri talebi, herhangi iki düğüm arasında araç kapasitesini aşarsa, zaman penceresi nedeniyle rota kırılması meydana gelmekte ve devamında aynı rotada yer alan, kalan müşteriler için ise zincirleme rota kırılması oluşmaktadır. Araştırmacılar problemi uyarlamalı geniş komşu arama algoritması ile çözmüşlerdir [100]. Zhang, Lam ve Chen de yaptıkları çalışmada ZP_STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulması için SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada ZP_STARP için, aracın müşteriye geç ve erken varışlarına ilişkin kısıtlarını içeren üç değişik yardımcı eylemli SPR yaklaşımıyla oluşturulan matematiksel model önerilmiştir [101].

Soonpracha, Mungwattana ve Manisri sabit filo büyüklüğüne sahip heterojen, karışık ZP_STARP üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar söz konusu problemi çözmek için, rotalar arası komşu arama yöntemiyle GRASP'ı birleştiren genetik algoritmanın modifikasyonuna dayanan bir yaklaşım önermişlerdir [102]. Araç kapasitesini dikkate alan çok amaçlı ZP_STARP, Gee ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Çalışmada problemin çözümü için, çok modlu mutasyon sezgiseli ile yerel aramaya dayanan ayrıştırma tabanlı çok amaçlı evrimsel algoritma kullanılmıştır [103].

Hem servis sürelerinin, hem de müşteri taleplerinin stokastik olduğu ZP_ARP Goel, Maini ve Bansal tarafından incelenmiştir. İncelenen problemde müşteri tatminini maksimize ederken toplam ulaştırma maliyetini de minimize edecek şekilde problemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Matematiksel modelin çözümünde uyarlanmış karınca kolonisi optimizasyonuna dayanan bir algoritma kullanılmıştır [104].

Hu ve arkadaşları, belirsiz servis süresi ve belirsiz talebin yer aldığı katı ZP_ARP'ni incelemiştir. Bu çalışmada ele alınan problemde, stokastik değişkenler nedeniyle meydana gelen yeni rotaya bağlı belirsizlik kümelerine dayanan robust optimizasyon yaklaşımıyla matematiksel model geliştirilmiştir. Problemi çözmek için, uyarlanmış değişken komşu arama sezgiseline dayanan iki aşamalı bir sezgisel yaklaşım kullanılmıştır [105].

Sun ve Wang tarafından yapılan çalışmada da robust yaklaşım ele alınmıştır. Problemde zaman penceresini aşan sapmaların toplamının minimizasyonu amaçlanmaktadır. Araştırmacılar problemi üst sezgisellerle parçacık sürüsü optimizasyonu ile genetik algoritmayı birleştiren hibrit bir algoritmayla çözmüşlerdir [106].

Teslim tarihlerinde ve seyahat sürelerinde/taleplerde belirsizlik durumu olan ARP Lee, Lee ve Park tarafından incelenmiş olup, araştırmacılar bu problem için robust bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Problemin matematiksel modeli, her müşteriye önceden belli olan teslim tarihlerine göre hizmet verileceği ve bu teslim tarihleri için bir zaman penceresinin bulunduğu varsayımı altında geliştirilmiştir [107].

Xiangguo ve Manying tarafından yapılan çalışmada ise soğuk zincir lojistiğinin yer aldığı STARP incelenmiştir. Bu problem oluşturulurken öncelikle soğuk zincir lojistiği ile ilgili bilgiler dikkate alınmış, sonrasında ise karışık ZP_STARP için matematiksel model

önerisinde bulunulmuştur. Problemin çözümünde ise uyarlanmış genetik algoritma yaklaşımı kullanılmıştır [108].

Zhang, Lam ve Chen, tam zamanında teslimatı dikkate alan ZP_STARP'ni incelemişlerdir. Çalışmada ilgili problem için üç farklı model önerisinde bulunulmuştur. İlk modelde, beklenen toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayarak müşteri taleplerini karşılayan uygun teslimat rotalarının oluşturulmasını, ikinci modelde, müşteri taleplerini tam zamanında karşılamak için teslimat yapılma olasılıkları toplamının maksimize edilmesini dikkate almakta olup, üçüncü modelde ise, müşteri teslimatlarının tam zamanında karşılanmasının yanında toplam maliyetin de minimize edilmesi amaçlanmıştır [109].

Saint-Guillain, Sohon ve Deville gerçek hayat problemlerinde karşılaşılan, müşteri taleplerinin tam olarak bilinmediği ve verilerdeki belirsizliği de dikkate alan statik ve stokastik ARP'yi inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Problemin matematiksel modelini SPR yaklaşımını kullanarak oluşturmuşlar ve problemi çözmek için yerel arama algoritmasını kullanmışlardır [110].

ÇDARP araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılan bir konu olmasına rağmen, müşteri taleplerinin stokastik olduğu, Çok Depolu Stokastik Talepli Araç Rotalama Probleminin (ÇD_STARP) birkaç çalışma dışında araştırmacılar tarafından çalışılmadığı tespit edilmiştir. Bu konu ilk kez Tillman tarafından incelenmiş olup, çalışmada müşteri taleplerinin poisson dağılımına sahip olduğu ve çok deponun yer aldığı ÇD_STARP olarak ele alınmıştır. Tillman incelediği problemi çözmek için Clarke & Wright'ın tasarruf algoritmasına dayanan sezgisel bir yöntem kullanmıştır [111].

Calvet, Juan ve Schefers yaptıkları çalışmada ÇD_STARP'nin matematiksel modelini güvenlik stokunun bulundurulması yardımcı eylemini kullanan SPR yaklaşımı ile oluşturmuşlardır. İnceledikleri problemi çözmek için Monte Carlo Benzetimi ile iteratif yerel aramayı birleştiren bir algoritma kullanmışlardır [112].

Calvet ve arkadaşları, sınırlı ÇD_STARP'nin matematiksel modelinin oluşturulmasında SPR yaklaşımını kullanmışlardır. Monte Carlo Benzetimi ile metasezgisel algoritmaları birleştiren bir yaklaşım ile modeli çözmüşlerdir [113].

Çok depolu, çok araçlı rotalama problemini inceleyen bir çalışma Chan, Carter ve Burnes tarafından yapılmıştır. İncelenen problemde müşterilerin talepleri, araç rotasına devam ederken müşteri lokasyonuna ulaşılmadan öğrenilmektedir. Müşterilerin beklenen talep değerleri ise daha önce hizmet verilen müşterilerin taleplerine göre belirlenmektedir [114].

Tatarakis ve Minis, çok ürünlü, tek araçlı ÇD_STARP'ni inceleyen bir çalışma yapmıştır. Tüm ürünlerin aracın tek bölmesinde saklandığı durum ile farklı çeşit ürünlerin kendine ait araç bölmesinde saklandığı durumu incelemişlerdir. Dinamik programlama yaklaşımını kullanarak beklenen rotalama maliyetini minimize etmeye çalışmışlardır [115].

Zuhori, Peya ve Mahmud ise yaptıkları çalışmada ÇD_STARP'yi çözmek için 3 fazlı bir algoritma önerisinde bulunmuşlardır. Çalışmada önce en yakın komşu arama yöntemini kullanarak müşteriler için bir sınıflandırma yapmışlardır. Sonraki aşamada ise araçların rotalarının oluşturulmasında alt kümelerin toplanması yöntemini kullanmışlar ve oluşturulan rotaları optimize etmek için açgözlü algoritmayı kullanmışlardır [116].

Uslu, Çetinkaya ve İşleyen yaptıkları çalışmada, ÇD_STARP için CCP yaklaşımı kullanarak bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları matematiksel modeli afet sonrası yardım malzemelerinin gerekli miktarda ve en kısa sürede ulaştırılabilmesi için, birden çok deponun yer aldığı ve taleplerin belirli olmadığı problem üzerinde kullanmışlardır. Önerdikleri matematiksel modeli doğrusal hale getirdikten sonra Ankara ilinin acil durum lojistiği için çözmüşlerdir [117].

Tüm müşterilerin taleplerini karşılayabilecek depo kapasitesi ile araç kapasitesinin sınırsız olduğu ÇD_STARP Christiansen ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar inceledikleri problemi Dal-Fiyat-Kesme algoritmasını kullanarak çözmüşlerdir [118].

Literatürdeki STARP konusundaki çalışmalar incelendiğinde, stokastik talepli topla dağıt ve eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi (ST_TD_ARP / ST_ETD_ARP) konularının araştırmacılar tarafından çok fazla çalışılmadığı tespit edilmiştir. Hou ve Zhou tarafından hem belirsiz servis süresinin bulunduğu, hem de stokastik talebin yer aldığı ST_ETD_ARP üzerine bir çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar inceledikleri problemin matematiksel modelini CCP yaklaşımıyla oluşturmuşlardır. Problemde uygun rotaları belirlemek için genetik algoritmaya dayanan bir yaklaşım kullanılmıştır [119]. Hou, Zhou

ve Zhao bir başka çalışmada ise, belirsiz servis sürelerine sahip ve taleplerin stokastik olduğu ETD_ARP'yi incelemişlerdir. Problemi çözmek için diferansiyel evrim algoritmasını kullanmışlar ve çözümü bulmak için yeni bir mutasyon operatörü geliştirmişlerdir. Araç kapasitesinin bir miktar aşılabilmesine izin vermişler ve araç kapasitesini aşan miktar kadar amaç fonksiyonuna ceza katsayısı eklemişlerdir [120]. Hou ve Zhou başka bir çalışmada ise yine belirsiz servis süreli ve stokastik talepli ETD_ARP'yi incelemişler ve problemin matematiksel modelini stokastik programlama yaklaşımıyla oluşturmuşlardır. Problemden rota optimizasyonunu sağlamak için sıra bazlı uygulamaya dayanan Kesikli Diferansiyel Evrim Algoritmasını kullanmışlardır [121].

Bir başka çalışmada da ST_TD_ARP Minis ve Tatarakis tarafından ele alınmıştır. Problemden gereken durumlarda aracın yükleme/ boşaltma için depoya gitmesine izin verildiği ve araç rotası oluşturulurken önceden belirlenen müşteri sırasının takip edilmesi gerektiği varsayılmıştır. Problemden seyahat maliyetinin minimize edilerek tüm müşterilere hizmet verilmesi amaçlanmaktadır [122].

ST_ETD_ARP konusunda bir diğer çalışma Wang ve Qiu tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışmada ST_ETD_ARP'yi çözmek için çapraz entropi yöntemine dayanan etkili bir algoritma kullanılmıştır [123]. Sürekli rassal topla-dağıt müşteri taleplerinin yer aldığı tek araçlı ve müşterilere önceden belirlenmiş olan bir sıralamada hizmet verilen ST_TD_ARP Dimitrakos ve Kyriakidis tarafından yapılan çalışmada ele alınmıştır. Araştırmacılar problemi çözmek için dinamik programlama yaklaşımını kullanarak, kesin sonuçlar elde etmişlerdir [124]. Berhan ise, Etiyopya'daki şehiriçi otobüs hatlarındaki, otobüslere binen inen müşterileri dikkate alarak oluşturduğu problemi, ST_ETD_ARP'ye benzeterek, problem için matematiksel model önerisinde bulunmuştur. Araştırmacı incelediği problemi çözmek için tasarruf algoritmasını kullanmıştır [125].

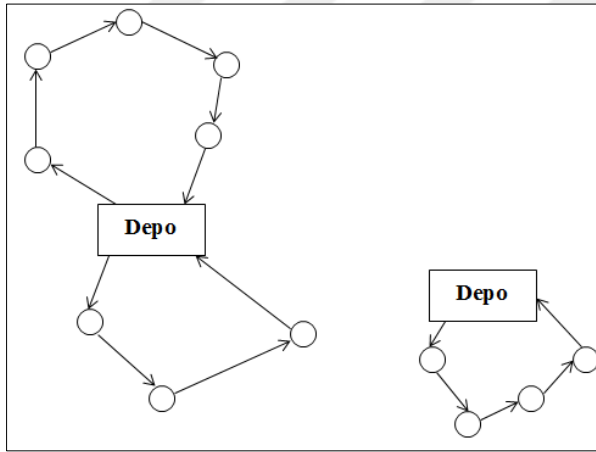
Ghilas, Demir ve Woensel zaman pencereli ST_TD_ARP incelemiş olup, problemde müşterilerin çizelgelenmediğini varsaymıştır. İnceledikleri problemi çözmek için senaryo bazlı örnek ortalama yaklaşımını kullanmışlardır. Geliştirdikleri yaklaşımın etkinliğini test etmek için literatürdeki örnek problemleri kullanmışlar, buldukları sonuçları, geniş komşu arama sezgiseli ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırarak, yöntemlerini değerlendirmişlerdir [126]. Zhu ve Sheu tarafından yapılan çalışmada ise, stokastik taleplerin yer aldığı, ürünleri toplayan ve teslim eden bir araç filosunun başlangıç rotalarını

belirleme problemi ele alınmıştır. Oluşturulan modelde tam rota kırılması ile yarı rota kırılmasına izin verilmesi varsayımı altında, rotadaki seyahat maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemi çözmek için, geniş komşu arama yaklaşımına dayanan bir algoritma önerisinde bulunmuşlardır [127].

Literatürdeki STARP konusundaki çalışmalar incelendiğinde, matematiksel modelin geliştirilmesinde SPR ve CCP yaklaşımlarının kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca literatürde bu konuda yapılan çalışmalarda, CCP yaklaşımının problemlere uygulanmasının daha kolay olduğu ve bu yüzden araştırmacılar tarafından tercih edildiği belirtilmiştir [15].

2.3. Çok Depolu Araç Rotalama Problemi

Çok depolu araç rotalama problemi (ÇDARP), müşteri taleplerinin farklı lokasyonlarda yer alan birden fazla depodan karşılandığı, toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayan araç rotalama problemidir. ÇDARP, tek depolu ARP ile karşılaştırıldığında, problemin daha karmaşık ve daha zorlu yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1. ÇDARP şebeke örneği

ÇDARP’de her deponun aynı özellikte araçlardan oluşan kendi araç filosu bulunmaktadır ve müşterilere bu araçları kullanarak hizmet verilmektedir. Müşteri taleplerinin karşılamak için tek bir deponun kapasitesi yeterli olmadığında müşterilere birden fazla depodan hizmet verilebilmektedir. Problemin amacı, tüm müşterilerin taleplerini karşılarken, araçlar tarafından toplam kat edilen mesafenin minimize edilmesidir [128].

2.3.1. ÇDARP için literatür taraması

Tek depolu ARP, ARP'nin en temel şeklini oluşturmaktadır. Ancak, gerçek hayatta karşımıza çıkan durumlar incelendiğinde, firmaların genelde birden fazla depoya sahip olduğu ve müşterilerine bu depolardan hizmet verdiği görülmektedir. Bu ARP çeşidi literatürde ÇDARP olarak adlandırılmaktadır. Literatürde ÇDARP konusunu ele alan çalışmalar yer almasına rağmen, diğer ARP'ler ile karşılaştırdığımızda, bu konunun daha az çalışıldığı dikkat çekmektedir. Bu bölümde ÇDARP konusunda yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

Taleplerin deterministik olduğu ÇDARP Tillman ve Hering tarafından incelenmiştir. Çalışmada Tillman'ın taleplerin stokastik olduğu durumdaki ÇDARP'de seçim kriteri olarak kullandığı prosedür, deterministik ÇDARP için uyarlanmıştır. Böylelikle başlangıçta en iyi seçimin yapılması sağlanmıştır [128]. Tillman ve Cain sonraki çalışmalarında ise ÇDARP'nin çözümü için Üst Sınır Algoritmasını geliştirmişlerdir. Araştırmacılar kullandıkları algoritmayla küçük boyuttaki problemlerin çözümünde optimal sonuçların elde edildiğini belirtmişlerdir [129].

Gillett ve Johnson yaptıkları çalışmada ÇDARP'yi çözmek için süpürme algoritmasını kullanmışlardır. Algoritmanın oluşturulmasında iki depodan hareket eden araçların, müşterilere hizmet verirken kat ettikleri mesafenin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada geliştirilen algoritmanın büyük boyutlu problemlerde optimale yakın çözüme ulaştığı belirtilmiştir [130].

Laporte ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kapasite ve minimum maliyetin amaçlanması kısıtları altındaki asimetrik ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar problemi dal ve sınır algoritması ile çözmüşler ve 80 düğüme kadar olan problemler için optimal çözümü elde etmişlerdir [131].

Chao ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada ÇDARP'yi çözmek için bir algoritma önerisinde bulunmuşlardır. Araştırmacılar geliştirdikleri algoritma ile diğer yöntemlere göre daha iyi çözümler elde ettiklerini belirtmişlerdir [132].

Renaud ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kapasite ile rota uzunluğu kısıtlamaları varsayımlarını dikkate alan ÇDARP'yi incelemişler ve problemi çözmek için Tabu Arama yaklaşımını kullanmışlardır [133].

Salhi ve Sari yaptıkları çalışmada karışık ÇDARP'yi incelemişler ve problemi çözmek için çok aşamalı kompozit bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemin etkinliğini analiz etmek için depo sayısını 2 ile 9 arasında değiştirmişler ve 5 farklı araç kapasitesi için hesaplama yapmışlardır [134].

Cordeau ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Periyodik ARP, Periyodik GSP ile ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar inceledikleri problemleri çözmek için tabu arama yaklaşımını kullanmışlar ve yöntem ile her üç problem türünde de iyi çözümler elde edildiğini belirtmişlerdir [135].

Thangiah ve Salhi ise ÇDARP'yi çözmek için genetik algoritmaya dayanan Genetik Kümeleme yöntemini kullanmışlardır. Geliştirdikleri yöntemi analiz etmek için Christofides ve Eilon ile Chao'nun önerdiği test problemlerini kullanmışlar ve kullandıkları 23 test probleminden 11'inde en iyi sonucu elde ettiklerini belirtmişlerdir [136].

Giosa ve arkadaşları ise Zaman Pencereci ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar problemi çözmek için yeni bir atama sezgiseli geliştirmişlerdir [137]. Zaman penceresini dikkate alan bir diğer çalışma ise Polacek ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar problemi çözmek için değişken komşu arama sezgiselini kullanmışlardır [138].

Jin ve arkadaşları, ÇDARP için 0-1 tam sayılı matematiksel model geliştirmişler ve problemin çözümü için iki çözüm yöntemi önermişlerdir. İlk yöntemde, problemi 2 bağımsız alt probleme ayırmışlar ve sonra iki aşamalı bir yaklaşımla çözmüşlerdir. İkinci yöntemde ise, problemi, atama ve rotalama alt problemlerine entegre etmişlerdir [139].

Lim ve Wang tarafından yapılan çalışmada, araçların sabit dağıtım yaptığı varsayımı altındaki ÇDARP için bir matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Problemin çözümü için ise iki aşamalı bir yaklaşım geliştirilmiştir [140].

Dondo ve Cerdá filonun heterojen olduğu varsayımı altındaki Zaman Pencereli ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar problem için karışık tam sayılı matematiksel model önerisinde bulunmuşlar ve bu model ile 25 müşteriye kadar makul sürede optimal çözüme ulaşmışlardır. Araştırmacılar daha büyük boyuttaki problemleri çözmek için ise kümeleme bazlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir [141].

Bae ve arkadaşları ÇDARP'nin çözümüne ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada, literatürde yer alan matematiksel modellerden faydalanmış olup, modelin çözümü için gelişmiş genetik algoritma yaklaşımını kullanmışlardır [142].

Crevier ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ÇDARP'yi tabu arama ile alt problemlere ayırarak problemleri tam sayılı programlama ile çözmüşlerdir. Geliştirdikleri algoritmanın etkinliğini ise Cordeau ve arkadaşları tarafından önerilen test problemleri ile analiz etmişlerdir [143]. Ho ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ÇDARP'nin NP-hard özellikte bir problem olduğunu belirtmiş ve bu yüzden problemin çözümü için sezgisel algoritmalar üzerine odaklanmışlardır. Araştırmacılar problemi çözmek için başlangıç çözümünü değişken komşu arama ve Clarke & Wright'ın algoritmasıyla belirleyen hibrit genetik algoritmayı kullanmışlardır [144].

Tsirimpas ve arkadaşları, Çok Ürünlü ÇDARP üzerine çalışmış olup, inceledikleri problemde araçların belirli bir taşıma kapasitesine sahip olduğunu varsaymışlardır. Müşteri dizisinin rota başlamadan önce bilindiği düşünülerek inceledikleri problemde araçların optimal rotalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Söz konusu varsayımlar altında optimal rotaların oluşturulabilmesi için kesin çözüm veren dinamik programlama algoritmasını kullanmışlardır [145].

Ombuki-Berman ve Hanshar yaptıkları çalışmada kapasite ve rota uzunluğu kısıtlamaları altındaki ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar problemi çözmek için genetik algoritmayı kullanmışlardır [146].

Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada araçların tam kapasite ile yük taşıma kısıtı altındaki kapasitelendirilmiş ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar bu problem için bir matematiksel model geliştirmişler ve modelde boş aracın hareketini minimize etmeyi

amaçlamışlardır. Büyük boyuttaki problemlerin çözümü için iki aşamalı açgözlü algoritmayı kullanmışlardır [147]

Bir merkez depodan diğer depolara dağıtımın gerçekleştirildiği ve depolardan da müşterilere dağıtım yapılan ÇDARP Yu, Yang ve Xie tarafından incelenmiştir. Söz konusu problem gelişmiş karınca kolonisi optimizasyonu yöntemi kullanılarak çözülmüştür [148].

ÇDARP ile Bölünmüş Dağıtımli ÇDARP Gulczynski ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Matematiksel modelin oluşturulmasında, bölünmüş taleplerin yer aldığı araçların kat ettiği mesafenin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, bu problemleri çözmek için tam sayılı programlama modeline dayalı bir sezgisel geliştirilmiştir [149].

Yücenur ve Demirel ise ÇDARP'nin çözümüne ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar ÇDARP'yi çözmek için genetik kümelemeye dayanan geometrik şekilli bir algoritma geliştirmişlerdir. Kullandıkları yaklaşımın etkinliğini analiz etmek için literatürde yer alan test problemlerinden faydalanmışlardır [150]. Araştırmacılar aynı yıl yaptıkları diğer çalışmalarında ise problemi çözmek için genetik algortima ile karınca kolonisi optimizasyonu birleştiren hibrit bir algoritma kullanmışlardır [151].

ÇDARP için tam sayılı doğrusal programlama modeli Ray ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Oluşturdukları modeli, müşteri hizmetleri için uyarlamışlardır. Matematiksel modelin başka kısıtların yer aldığı ARP çeşitlerine de uyum sağlayacak şekilde esnek bir yapıya sahip özellikte olduğunu belirtmişler ve söz konusu çalışmada modelin başka modellere dönüştürülmesinde uygulanacak süreçten de bahsedilmiştir. Geliştirdikleri matematiksel modeli sezgisel bir yöntem geliştirerek çözmüşler ve buldukları sonuçları literatürdeki diğer yöntemlerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [152].

Heterojen filolu ve araç sayısının sınırlı olduğu ÇDARP için Salhi ve arkadaşları tarafından bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modelde depoya dönen araçların boş olması garanti edilmekte ve her yüklemeden sonra araç yükünün hesaplandığı varsayılmaktadır. Araştırmacılar problemin çözümü için uyarlamalı değişken komşu arama algoritmasını geliştirmişler, Salhi ve Sari'nın önerdiği test problemlerini kullanarak geliştirdikleri matematiksel modelin etkinliğini test etmişlerdir [153].

Kapasite ve rota uzunluğu kısıtlamalarını dikkate alan ÇDARP Contardo ve Martinelli tarafından ele alınmıştır. Çalışmada probleme optimal çözüm bulabilecek bir algoritma önerisinde bulunulmuştur [154].

Turu kapsayan ÇDARP Allahyari ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Geliştirdikleri matematiksel modelde, rotaların belirli bir müşteri grubunun ziyaretine izin vermeyebileceği kısıtının yanında bütçe zaman ve kaynaklar ile ilgili kısıtları da dikkate alınmıştır. Araştırmacılar bu problemi, Çok Depolu GSP olarak tanımlamışlar ve tavlama benzetimi algoritması ile uyarlamalı yerel arama algoritmasının kombinasyonundan oluşturulan bir algoritma ile çözmüşlerdir [155].

ÇDARP, PARP, Periyodik ÇDARP için minimum araç sayısını belirleyecek matematiksel model Rahimi-Vahed ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Yapılan çalışmada, önerilen matematiksel modeller modüler sezgisel algoritma (modular heuristic algorithm - MHA) ile çözülmüştür. Araştırmacılar, literatürde yer alan test problemlerini kullanarak modelin etkinliğini test etmeye çalışmışlar ve önerdikleri yöntemin her 3 problem türü için de, hem çözüm süresi açısından hem de hesaplama kalitesi açısından yüksek performans verdiğini belirtmişlerdir [156].

ÇDARP, çoklu toplama ve teslimat taleplerini içerecek şekilde Kunnappapdeelert ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Ele aldıkları problemi çözmek için iki çeşit evrimsel algoritma geliştirmişlerdir [157]. Lalla Ruiz ve arkadaşları ÇDARP'ye bazı yeni kısıtlar ekleyerek problem için yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir [158].

Bae ve Moon zaman pencereli ÇDARP'yi için oluşturdukları modelin, elektronik cihazların teslimi ve montajında kullanılan araçlar ile lojistik ve tedarik zincirinde kullanılan araçlarda uygun rotaların oluşturulmasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, ele aldıkları problem için karma tam sayılı matematiksel model önerisinde bulunmuşlar ve modeli genetik algoritma ile çözmüşlerdir [159].

Heterojen depoların yer aldığı ve müşterilerin talepleri dikkate alınarak müşterilerin istedikleri depolara atanabildiği ÇDARP, Calvet ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada incelenen problemi çözebilmek için araştırmacılar, istatistiksel öğrenme tekniklerini dikkate alan metasezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. İstatistiksel öğrenme

tekniklerinden faydalanılarak, geçmiş verilere bağlı olarak herhangi bir depoya atanan müşterinin talebine göre, müşterinin yeni talebinin tahminine izin verilmektedir. Ayrıca çalışmada, müşterinin harcadığı miktarın tahmini için de stokastik yerel arama yöntemine dayanan sezgisel bir algoritma kullanılmıştır [160].

Çok Depolu Çok Periyotlu Heterojen Filolu ARP, Mancini tarafından gerçek hayat problemlerine uygulanmaya çalışılmıştır. Çalışmada, söz konusu problemde yer alan dağıtım maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanarak karışık tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. İncelenen problem uyarlamalı geniş komşu arama yöntemiyle çözülmüştür [161].

ÇDARP'yi inceleyen bir başka çalışma Oliveira ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada inceledikleri problemin toplam rotalama maliyetini en küçüklemek için işbirlikçi ortak evrimsel algoritmayı kullanmışlardır [162].

Tamir ve toplama araçlarının birlikte incelendiği Zaman Pencereci ÇDARP, Rabbani ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. İncelikleri problemde 2 adet tamir aracının, bir adet ise toplama aracının olduğunu varsaymışlardır. Problemde zaman penceresi ihlalleri ile toplam rotalama maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemi çözmek için temel genetik algoritma ile hibrit genetik algoritma olmak üzere 2 farklı metasezgisel yöntem kullanmışlardır [163].

Soto ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise, araçların farklı depolardan rotalarına başlayarak müşterilerin taleplerinin karşılandığı, rota tamamlandıktan sonra da aracın depoya dönmek zorunda olmadığı varsayımı altındaki kapasitelendirilmiş ÇDARP ele alınmıştır. Araştırmacılar söz konusu problemi tabu arama ile değişken komşu arama algoritmasının hibritleştirilmesiyle oluşturdukları sezgisel ile birden fazla komşunun birleşik halini dikkate alabilen ejeksiyon zinciri sezgiselini kullanarak çözmüşlerdir [164].

Tehlikeli madde taşımalarını dikkate alan ÇDARP, Du ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çalışmada, tehlikeli maddelerin müşterilere birden fazla depodan teslim edildiği varsayılmış ve toplam taşıma riskinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemi çözmek için, bulanık simülasyon tabanlı sezgisel algoritmayı kullanmışlardır [165].

Bulanık ÇD_ETD_ARP ise Nadizadeh tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada, müşterilerden gelen dağıtım ve toplama taleplerinin bulanık olduğunu varsayılmıştır. Problemden, araçların dağıtımları sonucunda karşılaştıkları toplam maliyetin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Araştırmacı incelediği problemi, bulanık güvenilirlik teorisine dayanan, bulanık olasılık kısıtlı programlama modelini kullanarak modellemiştir. K-ortalama kümele algoritması ile karınca kolonisi optimizasyonunu birleştiren hibrit bir algoritma geliştirerek söz konusu problemi çözmüştür [166].

Teslimat zamanlarını dikkate alan bir çalışma Bi ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar inceledikleri problemin çözümü için HMOEA (Hybrid Multi Objective Evolutionary Algorithm) olarak isimlendirdikleri hibrit çok amaçlı evrimsel algoritmayı geliştirmişlerdir. Önerdikleri algoritmanın arama yeteneğini iyileştirmek için, iki aşamalı yerel arama ile sipariş bazlı kesme – yapıştırma işlemini kullanmışlardır [167].

Çok Depolu Yeşil Araç Rotalama Problemi (ÇD_YARP) Jabir ve arkadaşları tarafından incelenmiş ve yapılan çalışmada bu problem için bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Önerdikleri matematiksel modeli, küçük boyutlu problemler için LINGO programını kullanarak çözmüşlerdir [168].

Müşteri taleplerinin belirli bir tarihte teslim edilmesinin dikkate alındığı Zaman Pencere Periyodik ÇDARP Cantu-Funes ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu problem, araçların fabrikalara devredilmesini, fabrika ve dağıtım merkezleri arasındaki rotaların belirlenmesini, ulaşım maliyetlerinin en aza indirilmesini ve kiralanacak ek araçların sayısının en küçüklenmesini amaçlamaktadır. Araştırmacılar inceledikleri problem için karışık tam sayılı matematiksel model geliştirmişler ve problemi çözmek için GRASP'a dayanan bir algoritma kullanmışlardır [169].

ÇDARP'yi inceleyen bir başka çalışma Bezerra ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada tüm müşterilere servis edecek, araç kapasitesi ve depo başına araç sayısı gibi değişkenleri dikkate alacak şekilde kısıtlar oluşturulmuş ve önerilen matematiksel modelde rotalama maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Araştırmacılar bu problemi, genel değişken arama algoritmasına dayanan bir algoritmayla çözmüşlerdir [170].

Alinaghian ve Shokoihi yaptıkları çalışmada çok bölmeli araçları dikkate alan ÇDARP'yi incelemişler ve bu problem için bir doğrusal programlama model önerisinde bulunmuşlardır. Problemde, toplam çapraz rotalamanın en aza indirilmesi ve taşıt sayısının en azlanması amaçlanmıştır. Büyük ölçekli problemlere çözüm bulabilmek için, değişken komşu arama algoritması ile uyarlamalı geniş komşu arama algoritmasını birleştiren hibrit bir algoritma kullanılmıştır [171].

Bolanos ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Heterojen Filolu ÇDARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar problemin matematiksel modelinin oluşturulmasında, müşterilere ve kullanılan her bir depoya atanacak araçları belirlemek, bir dizi müşterinin taleplerini yerine getirmek ve araçların güzergâhlarının oluşturulması kısıtlarını dikkate almışlardır. Genetik algoritma ile yerel arama stratejilerini birleştiren bir sezgisel geliştirerek problemi çözmüşlerdir. Başlangıç çözümünde çeşitlilik yaratmak için ise, problem üzerinde hibrit başlatma popülasyon prosedürünü kullanmışlardır [172].

Yakıt tüketimini dikkate alan ÇDARP, Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir. Araştırmacılar bu problemde, bir depodan hareketine başlayan aracın rota sonunda aynı depoya dönmesine gerek olmadığını, araçların ortak kullanılan depolara da dönüş yapabileceği varsayımını dikkate almışlardır. Problemde faydayı ölçmeye çalışmışlar ve mesafe ile yakıt tüketimini “2” ye kadar çıkaran fayda oranını, paylaşılmayan depolar ile paylaşılan depolar arasındaki oran ve rotadaki maksimum fayda oranları hesaplanmıştır. Bu çalışmada incelenen problemde, paylaşılan depo kaynakları altındaki maksimum potansiyel fayda, paylaşılmayan depolarla karşılaştırılarak daha iyi hale getirilmesi amaçlanmıştır [173].

Son mil dağıtımında ortaya çıkan teslimat seçeneklerini içeren İki Aşamalı ÇDARP ise Zhou ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu problemde aslında 2 adet rotalama problemi mevcuttur. İlk problemde, müşteri talepleri dikkate alınarak, müşteriler için alt kümeler oluşturulur ve müşteri taleplerini depolardan taşıyan araç rotaları oluşturulur. İkincisinde ise, daha önceki problemin çözümünde belirlenen alt kümelerden, araçların tüm müşterilere hizmet verebilecek şekilde rotalar belirlenir. Araştırmacılar problemi çözebilmek için ise hibrit çok popülasyonlu genetik algoritmayı dayanan bir sezgisel yöntem kullanmışlardır [174].

Filo büyüklüğünü dikkate alan Karışık ÇDARP, Lahyani ve arkadaşları tarafından incelenmiş ve çalışmada bu problem için bir doğrusal programlama modeli önerisinde bulunulmuştur. Bu problemde, değişken rotalama maliyetleri ile sabit araç maliyetlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Araştırmacılar matematiksel modeli çözmek için, dal-kesme ile dal-sınır algoritmalarıyla oluşturulan bir algoritma kullanmıştır [175].

Zaman pencereci periyodik ÇDARP Agardi ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çalışmada müşterilerin yalnız bir kez ziyaret edilmediği, müşterilere periyodik ziyaretler gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Problemde katedilen mesafenin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için hibrit bir sezgisel geliştirilmiştir [176].

Azadeh ve Farrokhi-Asl yaptıkları çalışmada, iç ve dış araç filosunu dikkate alan açık-kapalı karışık ÇDARP'yi incelemiştir. Problemde araçların heterojen olduğunu varsaymışlardır. Araştırmacılar, inceledikleri problemin karışık tam sayılı programlama modelini oluşturmuş ve modeli genetik algoritma ile çözmüşlerdir [177].

Li ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, çok amaçlı, ÇD_YARP'ı ele almışlardır. İnceledikleri problemde kârı maksimize etmeye çalışırken, maliyet zaman ve karbon emisyonunu ise minimize etmeye çalışmışlar ve modeli geliştirilmiş karınca kolonisi optimizasyonunu kullanarak çözmüşlerdir [178]. ÇD_YARP'ı inceleyen bir başka çalışma Wang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada zaman bağımlı hızın yanı sıra, erken ve geç teslimatta karşılaşılan parçalı ceza fonksiyonu da kullanılmıştır. Problemde, karbon emisyonu ile rotalama maliyeti ve müşterilere erken veya geç teslimattan dolayı karşılaşılan ceza maliyetleri minimize edilmeye çalışılırken, müşteri memnuniyeti maksimize edilmeye çalışılmaktadır. Problemin çözümü için süpürme algoritması ile tasarruf algoritmasını birleştiren hibrit algoritma ile çok amaçlı parçacık sürü Optimizasyonuna dayalı hibrit algoritma kullanılmıştır [179].

Makine fabrikasının bakım faaliyetlerini asimetrik ÇDARP'ye uygulayan çalışma Li ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Problemde müşterinin zaman penceresi, tamircinin çalışma süresi, araç kapasitesi, filo büyüklüğü vb. kısıtları dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için birleşik komşuluğu dikkate alan ayırık ateş böceği algoritmasına dayanan bir yaklaşım kullanılmıştır [180].

ÇDARP'yi inceleyen bir başka çalışma Prabu ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ÇDARP için herhangi bir matematiksel model önerisinde bulunulmamış, literatürde yer alan matematiksel modeller kullanılarak, problemin çözümü için etkili bir algoritma geliştirilmeye çalışılmıştır. Problemi çözmek için sıralı mesafe vektörüne dayanarak geliştirilmiş genetik algoritma kullanılmıştır [181].

Gusavac ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, havacılıkta optimal tarımsal arazi artırımı problemini ÇDARP gibi düşünerek modellemişlerdir. Problem için karışık tam sayılı matematiksel model oluşturmuşlardır. Bu matematiksel modelde homojen bir aracın nakliyesi için, farklı tedarik noktalarından (hava sahalarından) farklı talebe kadar ürün (arazi işlemede kullanılan kimyasallar) konumlar için (tarımsal parseller) bir minimum maliyet planının olduğu ÇDARP'nin özel bir çeşidi şeklinde oluşturmuşlardır. Problemin karmaşıklığından dolayı problemi çözmek için sezgisel yöntemleri kullanmışlardır [182].

Mahmud ve Haque tarafından yapılan çalışmada ÇDARP için model geliştirmemiş, literatürde yer alan matematiksel modeli çözmek için genetik algoritmaya dayanan bir algoritma önermiştir [183].

Wang ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada çok depolu kümülatif ARP'yi incelemişlerdir. Bu çalışmada söz konusu problem için toplam varış zamanını en küçükleyecek şekilde matematiksel model önerisinde bulunulmuş ve etkili perturb tabanlı yerel arama algoritması ile model çözülmüştür [184]. Ramachandiran ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ÇDARP'yi çözmek için sıralı mesafe vektörüne dayalı genetik algoritmayı kullanmışlardır [185]. Lahyani ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Çok Depolu Açık ARP'yi incelemişlerdir. Araştırmacılar inceledikleri problemde bir depodan hareketine başlayan aracın rota sonunda depoya dönmek zorunda olmadığını varsaymışlardır. Problemin çözümü için hibrit uyarlamalı geniş komşu arama algoritmasını kullanmışlardır [186].

Fitriana ve arkadaşları, bir lastik firmasındaki tedarik zinciri yönetimini ÇDARP olarak modellemişlerdir. Problemde depolardan müşterilere hizmet verilirken en kısa zamanın ve mesafenin dikkate alınması amaçlanmıştır. Araştırmacılar inceledikleri problemi genetik algoritma ile çözmüşlerdir [187].

Ramos ve arkadaşları yaptıkları çalışmada heterojen araç filosu ile maksimum rotalama zamanını dikkate alan ÇDARP için bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Önerdikleri matematiksel modeli literatürde yer alan diğer modeller ile karşılaştırmışlar ve modelin, Miller ve arkadaşları ile Dantzig ve arkadaşları tarafından geliştirilen matematiksel modellere göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir [188]. Araştırmacılar başka bir çalışmalarında ise, depolar arası rotalara da izin veren ÇDARP'yi incelemişlerdir. Problem için karışık tam sayılı bir matematiksel programlama modeli geliştirmişlerdir. Problemin karmaşıklığından dolayı ancak küçük boyutlu problemler için optimal çözümün bulunabileceğini belirtmişlerdir. Bu yüzden orta ve büyük boyuttaki problemleri çözmek için yeni bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir [189].

Brandão yaptığı çalışmada Çok Depolu Açık ARP'yi incelemiştir. Bu problemin KARP'ten farkı, bir depodan hareketine başlayan aracın, müşterilerin taleplerini karşıladıktan sonra aynı depoya dönmek zorunda olmamasıdır. Yapılan çalışmada söz konusu problemin çözümü için hafızayı dikkate alan iteratif yerel arama algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmada her iterasyonda bulunan sonuçlar geçmiş verileri kullanarak güncellemekte ve geçmişe göre daha iyi sonuç bulunmaya çalışmaktadır [190].

Araç rotasına devam ederken ortaya çıkabilecek dağıtım hatası, araç bozulması gibi risk durumlarını dikkate alan ÇDARP Soeanu ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Problemin çözümü için, araç arızası veya kargo teslimatı başarısızlığı nedeniyle ortaya çıkan maliyetler ile rotalama maliyetini en küçükleyecek şekilde çözüm bulan maliyet etkili öğrenmeye dayalı bir sezgisel algoritma önerisinde bulunulmuştur [191].

Zhen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, teslim tarihleri ile zaman pencersini dikkate alan Çok Depolu, Çok Turlu ARP'yi incelemişlerdir. Çalışmada toplam seyahat süresini minimize etmek amacıyla farklı depolardaki araç filosu belirlenmeye çalışılmıştır. Problem karışık tam sayılı doğrusal programlama ile modellenmiş, problemi çözmek için hibrit parçacık sürü optimizasyonu ile hibrit genetik algoritma kullanılmıştır [192].

ÇDARP'yi inceleyen bir başka çalışma Stodola tarafından yapılmıştır. Araştırmacı ÇDARP'yi çözmek için önce tavlama benzetimi algoritmasını kullanmış ve bu sezgiseli kullanarak elde ettiği sonuçlar algoritmanın girdi parametreleri olarak almıştır. Çalışmanın

devamında ise karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasını daha iyi çözümler elde etmek için kullanmıştır [193].

2.4. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi

Araç rotalama probleminin bir türü olan Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD_ ARP), depolardan müşterilere yapılan dağıtım işlemleri ile müşterilerden depolara gönderilen ürünlerin toplanmasının eş zamanlı olarak aynı araçla yapıldığı problem türüdür. Bu tür problemlerde amaç, müşterinin toplama ve dağıtım taleplerinin aynı anda karşılanmasıyla birlikte, müşteriye bir kere uğranılması, böylece de bu işlemler için birden fazla kez müşterinin ziyaret edilmesine gerek kalmamasıdır [7]. Sonuç olarak ETD_ ARP’de, müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini eş zamanlı olarak karşılayan araçların kat ettikleri toplam mesafenin minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

ETD_ ARP’de bir müşteri aynı anda hem toplama talebine hem de dağıtım talebine sahip olabilmektedir. ETD_ ARP’de araç ilk olarak müşterinin dağıtım talebini müşteriye teslim etmekte, devamında ise müşteriden toplanacak ürünü almaktadır. ETD_ ARP ile minimum maliyetle müşterilerin hem dağıtım hem de toplama talepleri karşılandığından, günümüzde birçok gerçek hayat probleminde karşımıza çıkmaktadır. Çünkü dağıtım ve toplama işlemlerinin farklı rotalarda yer alan araçlar tarafından ayrı ayrı gerçekleştirilmesi yerine, aynı rotada yer alan araçlar tarafından eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi önemli ekonomik faydalar sağlayabilmektedir. Marketlerde, depozitolu içeceklerin markete teslim edilip boş şişelerin toplanarak depoya/üretim tesisine taşınması, otomotiv sektöründe, yedek parçaların bayilere dağıtım sırasında, bayilerden de bozuk parçaların toplanarak fabrikaya taşınması, ETD_ ARP’ye örnek olarak verilebilir [10].

ETD_ ARP gerçek hayat problemlerinde genellikle tersine lojistik uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Firmalar günümüzde hammadde, yarı mamul veya mamullerin geri dönüşümü için tersine lojistik faaliyetine önem vermektedir. Tersine lojistik faaliyetleri, ekonomik avantajının yanı sıra, yasal sorumluluklar ve artan çevresel sorumluluk bilinciyle dikkat çeken bir konu haline gelmiştir. Özellikle atıkların toplanıp bertaraf edilmesi, geri dönüşümü, bozuk/hatalı ürünlerin toplanarak tamir edilmesi, yeniden işlenmesi, kullanılmış ürünlerin değerlendirilmesi gibi ekonomik ve çevresel konularda tersine

lojistik faaliyetleri, firmaların dağıtım ağlarını en uygun şekilde kullanmalarına zorlamaktadır [194].

2.4.1. ETD_ARP için literatür taraması

ETD_ARP literatürde ilk kez 1989 yılında Min tarafından incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, halk kütüphanesindeki kitapların dolaşımı ile alakalı bir problem incelenmiştir. Çalışmada problem için matematiksel model önerisinde bulunulmuş ve problem önce grupla-sonra rotala sezgiseliyle çözülmüştür [7]. Devamında ETD_ARP Halse tarafından çalışılmıştır. Yapılan çalışmada problemin çözümü için iki aşamalı, önce grupla sonra dağıt prensibine dayanan bir sezgisel algoritma kullanılmıştır [195].

Salhi ve Nagy, yaptıkları çalışmada ETD_ARP ile ÇD_ETD_ARP'ni incelemişlerdir. Yapılan çalışmada her iki problem türünün çözümü için, ekleme yöntemine dayanan sezgisel bir algoritma önerilmiştir [196]

Dethloff tarafından yapılan çalışmada, gerçek hayat problemlerine dayanan ETD_ARP için düğüm tabanlı bir matematiksel programlama modeli önerilmiştir. İncelenen problemin çözümü için ise, farklı boyutları dikkate alarak ekleme stratejileri uygulayan çözüm kurucu bir algoritma önerisinde bulunmuştur. Bu çalışmada ayrıca çözüm yönteminde kullanılan ekleme kriterlerinin algoritmanın performansı açısından etkileri ve yöntemin diğer ARP çeşitleri ile olan ilişkisi de incelenmiştir [197].

Tang ve Galveo yaptıkları çalışmada, ETD_ARP'nin çözümü için, KARP için geliştirilen tur parçalama ve süpürme algoritmalarını birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir [198].

Nagy ve Salhi, yaptıkları çalışmada, ETD_ARP için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Problemin çözümü için, ekleme tabanlı sezgisel bir yaklaşım kullanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan sezgisel algoritma ile ARP için uygun olmayan rotaların uygun rotalara dönüştürülmesinde kullanılan yaklaşımlar, ETD_ARP'ye uyarlanmıştır [199].

ETD_ARP konusunda özellikle son yıllardaki çalışmalarda, araştırmacıların ETD_ARP'yi çözmek için sezgisel ve metasezgisel yaklaşımları kullandıkları dikkat çekmektedir [10].

Crispim ve Brandoa'nın 2005 yılında yaptığı çalışmada ETD_ARP'nin çözümü için, tabu arama ile değişken komşu iniş algoritmasını birleştiren hibrit bir yaklaşım önerilmiştir [200]. Ropke ve Pisinger tarafından yapılan çalışmada ise, ETD_ARP'nin yanı sıra diğer ARP türlerini de çözebilecek özellikte olan geniş komşu arama sezgiselini geliştirilmiştir [201]. Chen, tabu arama algoritmasını tavlama benzetimi ile birlikte kullanarak ETD_ARP'nin çözümü için hibrit bir yaklaşım geliştirmiştir [202]. Chen ve Wu, ETD_ARP'nin çözümü için kayıttan-kayda seyahat algoritmasını kullanmışlardır [203].

Montane ve Galveo ETD_ARP için karışık tam sayılı matematiksel programlama modelini geliştirmişlerdir. Araştırmacılar inceledikleri problemi çözmek için 1-1 yer değiştirme, 1-0 yer değiştirme, çaprazlama ve 2-opt olmak üzere dört farklı komşuluk yapısı ile uzun dönemli hafıza mekanizmasını kullanan tabu arama algoritmasını önermişlerdir [204].

Bianchessi ve Righini ETD_ARP'nin çözümü için, yerel arama ve değişik çözüm kurucu algoritmalarla birlikte hat değiştirme ve düğüm değiştirmeye dayalı değişken komşuluk yapısını kullanan hibrit tabu arama algoritmasını geliştirmişlerdir [205].

Wassan ve arkadaşları ETD_ARP'nin çözümü için iki noktanın yerleştirilmesi, iki noktanın farklı rotalarda yer değiştirmesi ve rota yönünün ters çevrilmesi hareketleri olmak üzere üç farklı hareket mekanizmasından komşuluk yapılarını oluşturan reaktif tabu arama algoritmasını kullanmışlardır [206].

ETD_ARP'nin çözümü için Zachariadis ve arkadaşları tarafından yerel arama ile tabu arama algoritmalarını birleştiren karma bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Bu çalışmada problemi çözmek için ayrıca tabu arama algoritması ile uyarlamalı hafıza metodolojisine dayanan hibrit bir metasezgisel de geliştirilmiştir [207]. Ai ve Kachitvichyanukul da benzer problem üzerine çalışmış ve problemi çözmek için kuş sürüsü eniyileme algoritmasını kullanmışlardır [208]. Gajpal ve Abad ise, benzer problemi karınca kolonisi optimizasyonuna dayanan bir algoritma geliştirerek çözmüştür [209]. ETD_ARP'yi inceleyen bir başka çalışma Subramanian ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada problemin çözümü için iteratif yerel arama ile rassal olarak komşuluk yapısını değiştiren sezgisel algoritma önerilmiştir [210].

Minyong ve Erbao, Zaman Pencereli ETD_ARP (ZP_ETD_ARP) için karışık tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirmişler ve problemi diferansiyel evrim

algoritmasını kullanarak çözmüşlerdir [211]. 2011 yılında yapılan çalışmada Subramanian ve arkadaşları ETD_ARP'yi çözmek için Dal-Kesme algoritmasını geliştirmişlerdir [212].

Zachariadis ve Kiranoudis yaptıkları çalışmada ETD_ARP'yi çözmek için yerel arama tabanlı bir metasezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım ile çözüm komşulukları ve özel veri yapılarının araştırılabilmesi sağlanmıştır [213].

Tasan ve Gen, yaptıkları çalışmada, Detloff'un ETD_ARP için önermiş olduğu matematiksel programlama modelini kullanmışlardır. Problemi genetik algoritma temelli bir sezgisel algoritma ile çözmüşlerdir. [214].

Wang ve Chen yaptıkları çalışmada, ZP_ETD_ARP için karışık tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirmişlerdir. Diğer ARP türlerinde de olduğu gibi, ZP_ETD_ARP de NP-zor bir problem olduğundan dolayı kesin yöntemler ile makul sürede problemi çözememişlerdir. Bu yüzden problemi çözmek için, en ucuz ekleme yöntemini baz alan eş evrimli genetik algoritmayı önermişlerdir. Literatürde inceledikleri problem ile ilgili test verisi yer almadığından dolayı, Solomon'un test verileri yardımıyla kendi test verilerini oluşturmuşlar ve bu problemler ile önerdikleri algoritmanın etkinliğini test etmişlerdir [215].

Cruz ve arkadaşları, ETD_ARP' yi çözmek için tabu arama, en ucuz ekleme, çok rotalı en ucuz ekleme, yol yeniden bağlama, değişken komşu iniş ve değişken komşu arama algoritmalarını birleştiren hibrit bir yaklaşım önerisinde bulunmuşlardır. Geliştirdikleri sezgisel ile üç prosedür başlangıç için iyi çözümlerin bulunmasını sağlarken, tabu arama ve değişken komşu iniş prosedürlerini ise çözümü iyileştirmek için kullanılmıştır. Ayrıca sezgiselde, değişken komşu iniş prosedürü ile herhangi bir iyileşme sağlanamadığı tespit edilirse, tabu arama algoritması ile daha iyi sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır [216].

Rassal seyahat zamanlı ETD_ARP ise Zhang ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmada, problemi çözmek için dağılım arama sezgiseli kullanılmıştır [217].

Göksal ve arkadaşları ise, ETD_ARP'yi kuş sürüsü eniyileme algoritmasını kullanarak çözmüşlerdir. Geliştirdikleri algoritmada, yerel arama prosedürünü değişken komşu iniş yaklaşımını kullanarak oluşturmuşlardır. Algoritmada yer alan sürü çeşitliliğinin etkilenmemesi için ise tavlama benzetimini kullanmışlardır [218].

ZP_ETD_ARP'yi gerçek hayat problemi için kullanan bir çalışma Liu ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, hastaların evde bakılmasıyla ilgili lojistik problemi incelenmiş, medikal cihazların ve ilaçların hastanelerden ya da eczanelerden alınarak; hastaların evlerine dağıtımı ile hastalardan alınan kan, idrar testleri vb. ile kullanmadıkları cihazlar ile ilaçların hastaların evlerinden toplanması problemi ele alınmıştır. Araştırmacılar inceledikleri problem için iki adet karışık tam sayılı matematiksel model önermiş olup, modeli çözebilmek için tabu arama ile genetik algoritmayı birleştiren bir algoritma geliştirmişlerdir [219].

Avcı ve Topaloğlu yaptıkları çalışmada, ETD_ARP ile karışık ETD_ARP'yi çözebilmek için değişken komşu arama ile tavlama benzetim yaklaşımlarını birleştiren uyarlanmış yerel arama algoritmasını önermişlerdir. Geliştirdikleri algoritmanın etkinliğini artırabilmek için uyumlu hata fonksiyonunu algoritmaya dâhil etmişlerdir [220].

ZP_ETD_ARP'yi inceleyen bir başka çalışma, Wang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışmada, ZP_ETD_ARP için seyahat maliyetlerini minimize edecek özellikte bir matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Ekleme temelli paralel tavlama benzetimi algoritmasını ise problemi çözecek şekilde uyarlanmıştır [221].

Li ve arkadaşları, ÇD_ETD_ARP için doğrusal programlama modeli önerisinde bulunmuşlar ve problemi çözmek için iteratif yerel arama temelli bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [222].

ZP_ETD_ARP'yi ele alan bir çalışma da Gschwind tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, seyahat süresi ile maksimum seyahat süresi kısıtlarını içeren bir matematiksel model önerilmiştir. İncelenen problemi çözmek için, sütun üretme tekniğini baz alan dört farklı dal-kesme algoritması geliştirilmiştir [223].

İki Boyutlu Yükleme Kısıtlı ETD_ARP ise Zachariadis ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ele alınmıştır. Araştırmacılar inceledikleri problemi çözmek için yerel arama algoritmasına dayanan bir yaklaşım kullanmışlardır. Problemi daha hızlı çözebilmek için ise hafıza tekniğinden faydalanmışlardır [224].

Kalaycı ve Kaya ETD_ARP'yi daha hızlı çözebilmek için değişken komşu iniş algoritması ile karınca kolonisi optimizasyonunu birleştiren hibrit bir sezgisel algoritma önermişlerdir.

Ayrıca, karınca kolonisi optimizasyonunda çözüm ararken, çözümün yerel en iyi sonuca takılmasına engel olabilmek için, değişken komşu iniş algoritmasından faydalanmışlardır [225].

Iassinovskaia, Limbourg, ve Riane yaptıkları çalışmada kapalı döngü tedarik zincirinde üreticinin depodan müşterilere ürün gönderdiği ve geri dönüşümlü ürünleri topladığı bir dizi müşteri kümesini dikkate alan ZP_ETD_ARP'yi incelemişlerdir. Çalışmada küçük boyutlu problemlere optimal çözüm bulabilecek karışık tam sayılı bir matematiksel programlama modeli önerilmiş olup, büyük boyutlu problemleri çözebilmek için ise önce kümele – sonra rotala sezgiseline dayanan bir yaklaşım geliştirilmiştir [226].

Kartal ve arkadaşları, tek tahsis p-Merkez Medyan konumlu ETD_ARP'yi incelemişlerdir. İnceledikleri problemi gerçek hayat problemine uyarlayarak bir matematiksel programlama modeli geliştirmişlerdir. Araştırmacılar inceledikleri problemi çözmek için ise, karınca kolonisi optimizasyonu ile çok başlangıçlı tavlama benzetimini kullanmışlardır [227].

Wang ve Li yaptıkları çalışmada, Heterojen Filolu ZP_ETD_ARP'yi çözmek için 2 aşamadan oluşan hibrit bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmanın ilk aşamasında, zaman ve mesafe kavramlarını tanıtmışlar ve her müşteriye ait puanları belirlemek için ise genetik algoritmadan faydalanmışlardır. İkinci aşamada ise, değişken komşu arama ile problemi çözmüşlerdir [228].

Bayrak ve Özyörük tarafından ise Bölünmüş Talepli ETD_ARP incelenmiştir. Bu çalışmada, ETD_ARP'den farklı olarak, bir düğümün birden fazla kez ziyaret edilebileceği varsayılmış ve müşteri taleplerinin, araç kapasitesini aştığı durumlarda taleplerin bölünebileceği kabul edilmiştir. Söz konusu çalışmada, Bölünmüş Talepli ETD_ARP için iki farklı matematiksel model önerisinde bulunulmuş ve bu matematiksel modellerin etkinlikleri Christofides ve arkadaşları tarafından önerilen test problemleri kullanılarak analiz edilmiştir [229].

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda ise, depodan bir dağıtım merkezine dağıtım yapılan daha sonrasında ise bu dağıtım merkezlerinden müşteri taleplerinin karşılandığı iki aşamalı ARP incelenmiştir. Samani ve Motlagh iki aşamalı ETD_ARP için karışık tam sayılı

matematiksel programlama modeli önerisinde bulunmuştur. Genetik algoritma ile tavlama benzetimi algoritmasına dayanan hibrit bir sezgisel geliştirerek problemi çözmüşlerdir [230]. Belgin, Karaoğlu ve Altıparmak ise iki aşamalı problemde, ilk aşamada, dağıtım ve toplama işlemlerini, depodan uyduya doğru yapıldığını varsaymışlardır. İkinci aşamada ise dağıtım işlemleri ile toplama işlemlerinin uydulardan müşterilere doğru uydularda yer alan araçlar ile yapıldığını varsaymışlardır. Problem, düğüm tabanlı matematiksel programlama modeli ile modellenmiştir [231].

Li ve arkadaşları, Çok Amaçlı ZP_ETD_ARP'yi incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada bu problemi çözmek için ayrışmaya dayalı kimyasal reaksiyon optimizasyonuna dayanan bir algoritma kullanmışlardır. Önerdikleri sezgisel yöntemde, ayrıştırılmış olan her bir alt problem, bir molekül tarafından temsil edilmiştir. Her molekül, birden fazla komşu moleküle sahip gruplara ayrılmıştır. Çeşitlik sağlamak ve bu molekülleri birleştirmek için ise, yerel arama yaklaşımını kullanmışlardır [232].

Karimi yaptığı çalışmada ETD_ARP'yi incelemiştir. Bu problem için geliştirilen matematiksel programlama modelinde ise, önceden tanımlanmış araç kapasitesi, seyahat süresi ve depo kapasitesini de dikkate alarak toplam maliyeti minimize etmiştir. İncelenen problem merkez konumu ile eş zamanlı aracın rotasını belirleyen tabu aramaya dayanan bir sezgisel algoritma geliştirilerek çözülmüştür [233].

Majidi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yakıt tüketimi ile karbon emisyonunu minimize eden Eş Zamanlı Topla Dağıt Kirlilik Rotalama Problemini incelemişlerdir. Problem için doğrusal olmayan karışık tam sayılı matematiksel model önermişler ve modeli uyarlamalı geniş komşu arama sezgiselini kullanarak çözmüşlerdir [234].

Nadizadeh ve Nasab, kapasitelendirmiş ETD_ARP için, karışık tam sayılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar problemi çözmek için ise müşterileri kümelemek, uygun depoları kurmak, kümeleri depolara atamak, karınca kolonisi sistemi ile araç turları yapmak fazlarını içeren açgözlü kümeleme yöntemini kullanmışlardır [235].

Cömert ve arkadaşları, ETD_ARP'nin çözümüne yönelik iki aşamalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri çözüm yönteminde ilk aşamada kümeleme analizi uygulanarak müşteri kümeleme işlemi gerçekleştirilmiş, ikinci aşamada ise aynı kümede

yer alan müşterilerin rotalaması, müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini de dikkate alınarak yapılmıştır [236].

Atasagun ve Karaoğlu, Zaman Bağımlı ETD_ARP için İlk Giren İlk Çıkar (FIFO) varsayımını dikkate alan karışık tam sayılı matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır. Geliştirdikleri matematiksel modeli literatürde yer alan test problemleri ile test ederek, modelin performansını değerlendirmişlerdir [237].

Qin ve arkadaşları, karbona dayalı vergi miktarını düşürecek ve toplam maliyeti minimize edecek özellikteki ETD_ARP'yi incelemiştir. Bu problemde, amaç fonksiyonunda toplam maliyetin minimize edilmesinin yanında toplam emisyon miktarının da minimize edilmesi amaçlanmıştır. Problemde bulunan kısıtlar dikkate alınarak bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiş ve model uyarlanmış genetik algoritma ile çözülmüştür [238].

Marinelli ve arkadaşları ise kapıdan kapıya servisi dikkate alan ETD_ARP'yi incelemiştir. Problem için varsaydıkları kısıtları dikkate alarak karışık tam sayılı matematiksel model önerisinde bulunmuşlar ve modeli iki aşamalı bir meta-sezgisel yöntem ile çözmüşlerdir. Bu meta-sezgiselde ilk aşamada yapay arı kolonisini uygulamışlar, ikinci aşamada ise arı kolonisi optimizasyonunu kullanmışlardır [239].

Müşteri memnuniyetini dikkate alan çok amaçlı ETD_ARP ise Yan ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar bulanık zaman penceresi olduğunu varsaymışlar ve bu varsayımı da dikkate alarak karışık tam sayılı matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır. Çok amaçlı problemi çözebilmek için ise genetik algoritmaya dayanan bir yaklaşım kullanmışlardır [240].

Jia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iki aşamalı ETD_ARP'yi incelemiştir. Bu çalışmada ilk olarak inceledikleri problem için matematiksel model önerisinde bulunmuşlar, sonrasında ise, geliştirdikleri modeli çözmek için genetik algoritmaya dayanan bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [241]

Heterojen araç filosu ile zaman penceresini dikkate alan yer aldığı ETD_ARP ise Nepomuceno ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, önce inceledikleri problem için matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır. Ancak

problemin NP-zor özelliğinden dolayı, orta ve büyük boyuttaki problemlere makul sürede optimal çözüm bulamayacaklarını belirtmişlerdir. Bu yüzden, orta ve büyük boyuttaki problemleri çözebilecek özellikte uyarlanmış en yakın komşu arama algoritmasına dayanan bir algoritma geliştirmişlerdir [242].

Heterojen araç filosunu dikkate alan bir başka çalışma Madankumar ve Rajendran tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada, heterojen filonun yanında zaman penceresi kısıtlarını da dikkate alan ZP_ETD_ARP incelenmiştir. Araştırmacılar dikkate aldıkları varsayımları içerecek şekilde ilgili problem için, karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerisinde bulunmuşlardır. Sıkı ve gevşek zaman penceresi uygulayarak modelin etkinliğini analiz etmeye çalışmışlardır [243].

Hornstra ve arkadaşları, toplanan ürünlerin paketleme maliyetini de dikkate alan ETD_ARP üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, bir depodan hareket eden araçların hem müşterilerin dağıtım taleplerini karşıladığı, hem de toplama taleplerini taşıyarak aracın tekrar depoya döndüğü varsayılmıştır. İncelenen problem, uyarlanmış geniş komşu arama sezgiselini kullanılarak çözülmüştür [244].

Aydoğdu ve Özyörük yaptıkları çalışmada, Dinamik ETD_ARP'yi incelemişlerdir. Bu çalışmada müşterilerin taleplerinin dinamik olduğunu varsaymışlar ve bu varsayım altında karışık tam sayılı bir matematiksel önerisinde bulunmuşlardır. Problemin çözümü için, Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş Algoritması olarak adlandırılan yeni bir algoritma geliştirmişler ve algoritmanın etkinliğini literatürde yer alan test problemlerini kullanarak analiz etmişlerdir [245].

Günümüzde geri dönüşümün önem kazanması, müşterilerin beklentilerini daha iyi karşılayabilmek için, müşterilerden arızalı/bozuk ürünlerin toplanma işleminin de dikkate alınması son yıllarda ETD_ARP'nin araştırmacılar için ilgi çekici bir alan haline getirmiştir.

Literatürdeki STARP, ÇDARP ve ETD_ARP konusunda yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda bu üç varsayımı bir arada dikkate alan çalışmanın bulunup bulunmadığını tespit edebilmek için Ek 1'de verilen Çizelge oluşturulmuştur.

Çizelge incelendiğinde iki kısıtı dikkate alan çalışmaların bulunduğu, ancak Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin (STT_ÇD_ETDARP) daha önce incelenmediği tespit edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada da STT_ÇD_ETDARP ele alınmıştır.



3. STOKASTİK TOPLAMA TALEPLİ, ÇOK DEPOLU EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Gerçek hayat problemlerinde, müşteri taleplerinin, müşterilerin yer aldığı lokasyonların veya araçların taşıma sürelerinin, araç rotasına devam ederken kesin olarak bilinemediği problem tipi sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Araştırmacılar bu durum ile başa çıkmak için son yıllarda özellikle DARP ile SARP konularına yoğunlaşmıştır. SARP konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların genelde çalışmalarını STARP üzerine yaptığı dikkat çekmektedir. Literatürde STARP konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında ise, Çok Depolu STARP ve Eş Zamanlı Topla Dağıt STARP hakkında çalışmalar yapıldığı, ancak stokastik toplama talebinin dikkate alındığı Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin incelenmediği tespit edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (STT_ÇD_ETDARP) incelenmiştir. Bu bölümde ilk olarak ÇD_ETD_ARP için bir matematiksel model önerisinde bulunulmuş ve literatürde yer alan farklı boyuttaki test problemleri kullanılarak matematiksel modelin etkinliği analiz edilmiştir. Devamında ise toplama taleplerinin stokastik olduğu varsayımı altındaki ÇD_ETD_ARP için şans kısıtlı programlama yaklaşımı kullanılarak, STT_ÇD_ETDARP stokastik programlama modeli önerisinde bulunulmuştur.

3.1. ÇD_ETD_ARP İçin Geliştirilen Matematiksel Programlama Modeli

ÇD_ETD_ARP için geliştirilen matematiksel model için dikkate alınan varsayımları şunlardır:

1. Her bir araç hareketine aynı depodan başlar ve hareketini aynı depoda sonlandırır.
2. Her müşteriye bir araçla yalnız bir kez hizmet verilir.
3. Rotalarına devam eden araçların üzerindeki toplanan ve dağıtılacak yük miktarının toplamı araç kapasitesini aşamaz.
4. Bir depodan hareket eden araçlar aynı özellik ve kapasiteye sahiptir.
5. Bir müşterinin dağıtım ve toplama talepleri eş zamanlı olarak aynı araçla karşılanmaktadır.
6. Bir depodan harekete başlayan aracın başka bir depoya hareketine izin verilmemektedir.

7. Depolara atanan müşterilerin dağıtım taleplerinin toplamı, deponun kapasitesini aşamaz.
8. Müşterilere hizmet veren her bir araç bir depoya tahsis edilmektedir.
9. Müşterilerden taşınan toplama taleplerinin atık olarak ayrılacağı varsayılmış olup, müşterilerin toplama talepleri için depo kapasitesi dikkate alınmamıştır.

ETD_ ARP konusundaki literatürdeki çalışmalara incelendiğinde özellikle birkaç çalışmada önerilen matematiksel model [10,194,197,204] üzerine araştırmacıların odaklanarak çalışmalarına yön verdikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada da ETD_ ARP için literatürde yer alan modeller [10,194,197,204] incelenerek, Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ÇD_ ETD_ ARP) için matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. ÇD_ ETD_ ARP için oluşturulan matematiksel model aşağıda verilmiştir [10]:

Kümeler:

N_s : Depoların kümesi $N_s = \{0,1,\dots,m\}$

N_c : Müşterilerin kümesi $N_c = \{m+1, m+2, \dots, m+n\}$

N : Tüm müşterilerden ve depolardan oluşan küme $\{N_s \cup N_c\}$

Parametreler:

Q : Araç kapasitesi

c_{ij} : Dğümler arasındaki uzaklık, $i, j \in N, i \neq j$

d_i : Müşterilere yapılacak olan teslimat miktarları, $i \in N_c$

q_i : Müşterilerden toplanacak olan ürün miktarları, $i \in N_c$

M_k : k deposundan hareket eden araç sayısı, $k \in N_s$

B_k : k deposunun maksimum kapasitesi, $k \in N_s$

İkili Karar Değişkenleri:

x_{ij} : $\begin{cases} 1, & \text{Eğer } (i, j) \text{ ayrıtı herhangi bir tur üzerinde ise } \forall i, j \in N \\ 0, & \text{Aksi takdirde} \end{cases}$

y_{ik} : $\begin{cases} 1, & i \text{ müşterisine } k \text{ deposundan hizmet veriliyor ise } \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \\ 0, & \text{Aksi takdirde} \end{cases}$

Ek Karar Değişkenleri:

U_i : i düğümüne girmeden hemen önce araçtaki dağıtılacak olan ürün miktarını gösteren yardımcı karar değişkeni, $\forall i \in N_c$

V_i : i düğümünün çıkışında araçtaki toplanan ürün miktarını gösteren yardımcı karar değişkeni, $i \in N_c$

Matematiksel Model

Amaç Fonksiyonu:

$$Enk Z = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad i \in N_c, i \neq j \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji} = \sum_{j \in N} x_{ij} \quad i \in N, i \neq j \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in N_c} x_{kj} = M_k \quad \forall k \in N_s \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N_c} x_{ik} = M_k \quad \forall k \in N_s \quad (3.5)$$

$$\sum_{k \in N_s} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_c \quad (3.6)$$

$$x_{ik} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.7)$$

$$x_{ki} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.8)$$

$$x_{ij} + y_{ik} + \sum_{\substack{m \in N_s \\ m \neq k}} y_{jm} \leq 2 \quad \forall i, j \in N_c, i \neq j, \forall k \in N_s \quad (3.9)$$

$$U_j - U_i + Q * x_{ij} + (Q - d_i - d_j) * x_{ji} \leq Q - d_i \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (3.10)$$

$$V_i - V_j + Q * x_{ij} + (Q - q_i - q_j) * x_{ji} \leq Q - q_j \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (3.11)$$

$$U_i + V_i - d_i \leq Q \quad \forall i \in N_c \quad (3.12)$$

$$U_i \geq d_i + \sum_{j \in N_c} d_j x_{ij} \quad i \neq j, \forall i \in N_c \quad (3.13)$$

$$V_i \geq q_i + \sum_{j \in N_c} q_j x_{ji} \quad i \neq j, \forall i \in N_c \quad (3.14)$$

$$V_i \leq Q - (Q - q_i) \left(\sum_{k \in N_s} x_{ki} \right) \quad \forall i \in N_c \quad (3.15)$$

$$U_i \leq Q - (Q - d_i) \left(\sum_{k \in N_s} x_{ik} \right) \quad \forall i \in N_c \quad (3.16)$$

$$\sum_{i \in N_c} d_i y_{ik} \leq B_k \quad \forall k \in N_s \quad (3.17)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (3.18)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.19)$$

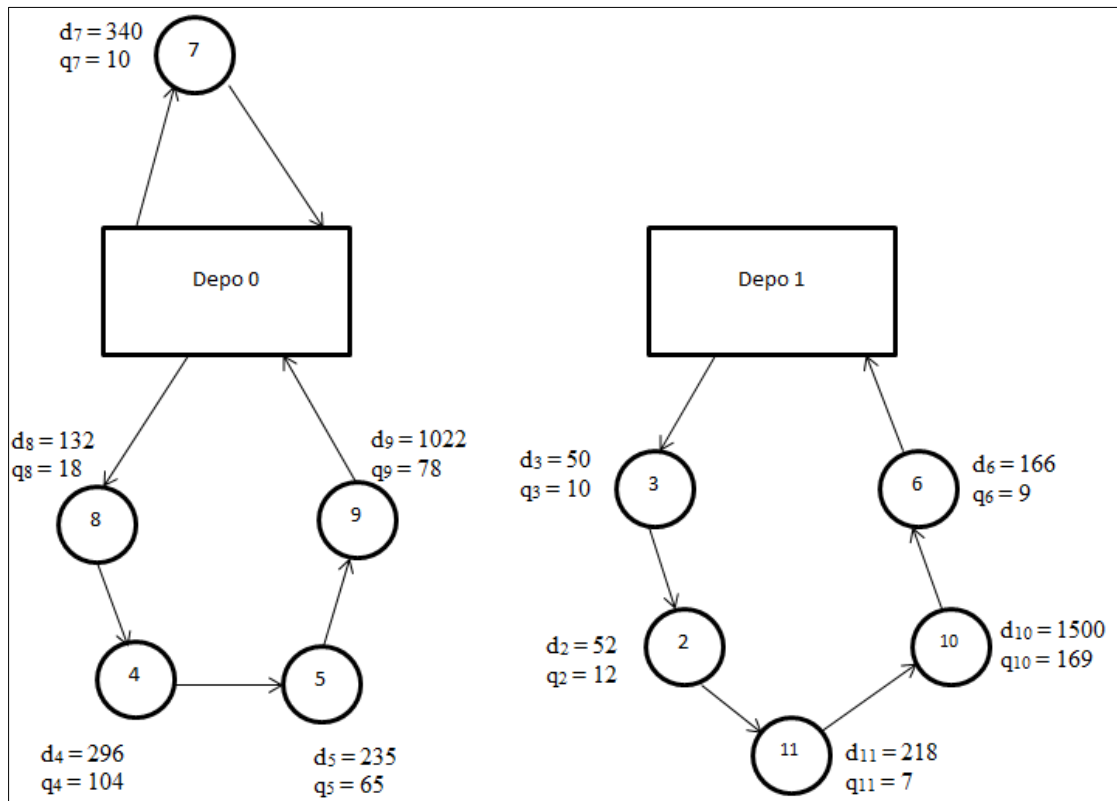
$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in N_c \quad (3.20)$$

$$V_i \geq 0 \quad \forall i \in N_c \quad (3.21)$$

$$M_k \geq 0 \quad \forall k \in N_s \quad (3.22)$$

Eş. 3.1 amaç fonksiyonunu göstermektedir. Matematiksel modelin amacı toplam maliyetin/seyahat mesafesinin/sürenin minimize edilmesidir. Eş. 3.2 her müşteriye bir kez uğranılmasını garantilemektedir. Eş. 3.3, bütün düğümlere giren ve çıkan hat sayısını birbirine eşitlemektedir. Eş. 3.4, k deposundan en fazla M_k adet aracın ayrılmasını sağlamaktadır. Eş. 3.5, k deposundan hareket eden M_k adet aracın rota sonunda tekrar k deposuna dönmesini garantilemektedir. Eş. 3.6, her müşterinin mutlaka bir depoya atanmasını garantilemektedir. Eş. 3.7 – Eş. 3.9 numaralı kısıtlar ise bir aracın rotasının başladığı depoda sonlanmasını garantilemektedir. Eş. 3.7, rota üzerindeki son müşterinin gireceği depoya, Eş. 3.8 numaralı kısıt rota üzerindeki ilk müşterinin çıktığı depoya atanmasını sağlarken, Eş. 3.9 numaralı kısıt rota üzerinde birbirine bağlı iki müşterinin farklı depolara atanmasını engellemektedir. Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 numaralı kısıtlar ise sırasıyla bir rota üzerinde araçtaki dağıtım talepleri ile toplama taleplerinin toplamlarının ayrı ayrı olarak kapasiteyi geçmemesini sağlamakla birlikte, alt turların oluşmasına da engel olmaktadır. Eş. 3.12 ise, rota üzerinde taşınan yük miktarının araç kapasitesinden küçük olmasını sağlamaktadır. Eş. 3.12 – Eş. 3.16 numaralı kısıtlar ise U_i ve V_i karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını belirlenmesini sağlamaktadır. Eş. 3.17 bir depoya atanan müşterilerin toplam talebinin, depo kapasitesini aşmamasını sağlayan depo kapasite kısıtıdır. Eş. 3.18 ve Eş. 3.19 işaret kısıtlarını göstermekte olup; x_{ij} ve y_{ik} değişkenlerinin “0” ya da “1” değerini almasını sağlamaktadır. Eş. 3.20 – Eş. 3.22 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarını göstermektedir.

Geliştirilen matematiksel modelin analiz edilmesi için, Christofides ve Eilon'un önerdiği E-n23-k3 test problemi kullanılmıştır [246]. Bu test probleminde 1 numaralı müşterinin bulunduğu lokasyonun da toplama ve dağıtım talepleri 0 olarak belirlenip depo olarak kabul edilmiş, böylece müşterilere farklı lokasyonlarda yer alan 2 depodan hizmet verilen ve 10 müşterinin yer aldığı sistem şeklinde ele alınmıştır. Geliştirilen matematiksel model, oluşturulan test problemi ile GAMS 24.1.3 programında kodlanmış ve elde edilen sonuçlar ile de Şekil 3.1'de verilen şebeke oluşturulmuştur. Çözülen problem için GAMS programında yazılan kod Ek 2'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Örnek problemten elde edilen sonuçların şebeke üzerinde gösterilmesi

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, mevcut problemde, 10 müşteriye 2 depodan hizmet verilmektedir. Depo 0'da 2 adet araç hareket ederken Depo 1'den 1 adet araç müşterilerin taleplerini karşılamak için hareket etmiştir. Depo 0'dan 2 araç ile toplamda 5 müşterinin talebi karşılanırken, Depo 1'den tek araç ile 5 müşterinin talebinin karşılandığı Şekil 3.1'de görülmektedir. Elde edilen rota incelendiğinde, rotanın hiçbir noktasında aracın kapasitesinin aşılmadığı tespit edilmiştir.

3.2. Test Problemlerinin Oluşturulması

Önerilen deterministik modelin etkinliğini analiz etmek için literatürde yer alan test problemleri kullanılmıştır. Christofides ve Eilon ile Augerat ve arkadaşları tarafından oluşturulan test problemlerinin farklı müşteri sayıları dikkate alınarak geliştirildiği görülmektedir [246,247]. Bu problemlerdeki x ve y koordinatları verilen müşteri noktalarının öklid uzaklığı hesaplanmış ve bu uzunluk tam sayıya çevrilerek bir noktadan bir noktaya taşıma maliyeti olarak alınmıştır. Literatürdeki test problemleri incelendiğinde bunların genellikle KARP'ının etkinliğini ölçmek için geliştirildiği görülmektedir. Bu yüzden problemlerin ÇD_ETD_ARP için uyarlanması gerekmektedir. Burada tek depolu problemler, müşterilerden biri depoymuş gibi varsayılarak, çok depolu problem şekline dönüştürülmüştür.

Literatürdeki çalışmalarda, dağıtım ve toplama taleplerinin belirlenmesinde, Salhi ve Nagy ile Angelelli ve Mansini tarafından önerilen yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Salhi ve Nagy tarafından önerilen yöntemde, her müşterinin yer aldığı x ve y koordinatlarına göre bir oran ($r_i = \min(x_i/y_i; y_i/x_i)$) dikkate alınmıştır [196]. Mevcut problemde yer alan talep değerleri bu oranlar kullanılarak dağıtım ve toplama talebi olarak bölünmektedir. Mevcut problemde, i müşterisinin orijinal talebi q_i ve dağıtım talebi d_i ve toplama talebi ise p_i olmak üzere, $d_i = r_i * q_i$ ve $p_i = q_i - d_i$ formülü kullanılarak hesaplanır. Angelelli ve Mansini tarafından geliştirilen yöntemde ise, problemdeki orijinal talep değerleri müşterinin talebi olarak alınmakta, toplama talebi ise müşteri numarasının çift veya tek numaralı olmasına göre değişiklik göstermektedir. $d_i = q_i$ olmak üzere, toplama talebi, i tek ise $p_i = [(1+\gamma)*q_i]$ ile i çift ise de $p_i = [(1-\gamma)*q_i]$ formülü ile hesaplanmaktadır [248].

Bu çalışmada, ÇD_ETD_ARP için önerilen matematiksel modelin etkinliğini araştırmak için, Christofides ve Eilon ile Augerat ve arkadaşları tarafından önerilen test problemleri kullanılmıştır [246, 247]. Christofides ve Eilon ile Augerat ve arkadaşları tarafından geliştirilen test problemlerinde müşterilerin yalnızca dağıtım talepleri dikkate alınmış olup, müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini birlikte içeren bir test problemi önerisinde bulunulmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada, test problemlerindeki taleplerden, dağıtım ve toplama taleplerinin belirlenmesi yöntemleri uygulanarak, ÇD_ETD_ARP için test problemleri oluşturulmuştur. İlk olarak Salhi ve Nagy'nin dağıtım ve toplama taleplerinin belirlenmesi için geliştirdiği yöntem kullanılmıştır [196]. Bu şekilde oluşturulan test

problemleri X tipi problemler olarak adlandırılmıştır. İkinci olarak ise Angelelli ve Mansini tarafından önerilen talep belirleme yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde önce $\gamma = 0,8$ olarak alınmış ve bu problemler Y tipi problemler olarak adlandırılmıştır. Sonraki aşamada ise $\gamma = 0,2$ olarak alınmış ve oluşturulan problemler ise Z tipi problemler olarak adlandırılmıştır [4,10].

Oluşturulan test problemlerinde, depo sayısının değiştirilmesinin çözüm süresi ve problemin çözümü üzerindeki etkisi de analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu yüzden ilk olarak model tek depolu olarak çözülmüş daha sonra ise depo sayısı ikiye çıkartılarak tekrar çözüm yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar ile araç kapasitesinin değiştirilmesinin amaç fonksiyonu ve çözüm süresi üzerindeki etkisi de analiz edilmeye çalışılmıştır. Araç kapasitesi ise, dağıtım ve toplama taleplerinin yarısı alınarak belirlenmiş, ayrıca bu iki değer arasında bir değer belirlenerek, 3 farklı araç kapasitesi oluşturulmuş ve bu kapasiteler dikkate alınarak problemler çözülmüştür. Burada araç kapasitelerinden toplama taleplerinin yarısı düşük, dağıtım taleplerinin yarısı yüksek, dağıtım talebinin yarısı ile toplama talebinin yarısı arasında bulunan değer ise orta olarak belirlenerek, araç kapasitesinin değiştirilmesinin, problemin çözüm zamanı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

3.2.1. Deneysel karşılaştırmalar

Deterministik ÇD_ETD_ARD için geliştirilen matematiksel model GAMS 24.1.3 ara yüzüne kodlanarak CPLEX 12.5.1.0 çözücüsü ile çözülmüştür. Her bir test probleminin çalıştırılması Intel Core i5-8265U CPU @1.60 GHz hızında işlemciye, 8 GB ara belleğe sahip, “Windows Home Single Language” işletim sistemi ile çalışan bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Her bir problemin maksimum 7200,00 saniye içerisinde çözüme ulaşması gerektiği varsayılarak GAMS programında kodlama yapılmıştır.

Matematiksel modelin etkinliğini analiz etmek için ise aşağıda verilen performans kriterleri kullanılmıştır:

Eniyi Çözüme Ulaşılan Problem Sayısı (EÇUPS): Belirlenen çözüm süresi içerisinde ($2*60*60=7200,00$ saniye) matematiksel modelin çözülmesi sonucunda eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı olarak değerlendirilmektedir [10].

Ortalama Çözüm Süresi (OÇS): Aynı boyuttaki farklı problemlerin modelde çözüme ulaştığı sürenin ortalaması alınarak elde edilen değeri göstermektedir. Burada en iyi çözümün elde edilememesi durumunda veya program tarafından herhangi bir hafıza hatası ile karşılaşılması sonucunda programın çalışmasının sonlanması ile elde edilen çözüm zamanı kullanılmıştır [10].

Yüzde Sapma Değeri (YSD): Matematiksel modelin GAMS programında CPLEX çözücüsü kullanılarak 7200,00 saniye çalıştırılmasıyla elde edilen tam sayılı üst sınır değeri ($Z^{\text{ÜS}}$) ile alt sınır değeri (Z^{AS}) arasındaki sapma yüzde sapma değeri ile ifade edilmektedir. Bu değer tüm test problemleri için Eş. 3.23'teki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlik kullanılarak, matematiksel model ile elde edilen çözüm sonucunun en iyi çözüme ne kadar yakın olduğu tespit edilebilmektedir [10].

$$\text{YSD}=100*\left(\frac{Z^{\text{ÜS}}-Z^{\text{AS}}}{Z^{\text{AS}}}\right) \quad (3.23)$$

Müşteri sayısı 10 ile 50 arasında değiştirilerek, dağıtım ve toplama taleplerinin farklı yöntemlerle belirlenmesi ile X,Y ve Z tipi problemler oluşturularak araç kapasitesi düşük, orta ve yüksek şeklinde alınarak farklı test problemleri oluşturulmuştur. Çalışmada modelin etkinliğinin test edilebilmesi için Christofides ve Eilon'un E-n23-k3, E-n30-k3, E-n30-k4, E-n51-k5 ile E-n101-k8 problemleri ile Augerat ve arkadaşlarının A-n60-k10, A-n64-k9, A-n65-k9 ile A-n80-k10 problemleri kullanılmıştır. Bu test problemlerinde müşteri sayısı değiştirilerek, aynı matematiksel modelde önce tek deponun yer aldığı sistem için çözülmüştür. İkinci aşamada ise, iki depolu sistem dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır. Böylece depo sayısının değiştirilmesinin, problem üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Her bir problem türü için 5 farklı örnek alınarak problemler analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile Çizelge 3.1 oluşturulmuştur. Çizelgede ilk üç sütun, müşteri sayısı, problem tipi ve araç kapasitesini göstermektedir. Takip eden diğer sütunlar ise sırasıyla, bu tip problemten çözülen örnek problem sayısını, bu problemler içinde en iyi çözüme ulaşan problem sayısını, ortalama çözüm süresini ve 5 problemin çözülmesi sonucunda elde edilen ortalama yüzde sapma değerini göstermektedir. Bu çizelgeden tek depolu problemlerin çözümü ile iki depolu problemlerin çözümü arasında ne gibi farklılıklar olduğu tespit edilebilmektedir. Ayrıca, Çizelge 3.1 incelendiğinde araç kapasitesinin

artırılmasının, problemin çözüm süresini düşürdüğü ve en iyi çözüme ulaşan problem sayısını ise artırdığı görülmektedir.

Analizlerin gerçekleştirilmesi için her bir problemin çözüm süresi 7200,00 s ile sınırlandırılmıştır. Ancak, özellikle 40, 45 ve 50 müşterinin yer aldığı problemlerde, GAMS programının CPLEX çözücüsünde, problem boyutu arttığından dolayı program hafıza hatası vermekte ve problemin optimal çözümü bulunamamaktadır. Ayrıca müşteri sayısı arttıkça da problemin 7200,00 s içerisinde optimal çözümünün bulunamadığı tespit edilmiştir. Tek depolu ve iki depolu problemlerin çözülmesiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, iki depolu problemlerde daha iyi sonuçlar elde edildiği ve ortalama çözüm süresinin daha düşük olduğu, en iyi çözüme ulaşılan problem sayısının daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Ortalama YSD'leri karşılaştırdığımızda, tek depolu problemlerde en yüksek YSD'nin %8,43 olduğu tespit edilmişken, iki depolu problemlerde ise en yüksek ortalama YSD'nin %1,77 olduğu tespit edilmiştir. Çizelgeyi incelediğimizde, iki depolu problemlerde elde edilen ortalama YSD'nin genel olarak tek depolu problemlerin ortalama YSD'lerine göre daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.

Bu bölümde matematiksel modelin etkinliğini analiz etmek amacıyla 405 tek depolu ve 405 iki depolu olmak üzere toplamda 810 adet test problemi çözülmüştür. Tek depolu durum için çözülen 405 problemde 349 adedinde 7200,00 s içerisinde optimal çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu problemlerin bir kısmında 7200,00 s içerisinde optimal çözüme ulaşılamazken, 40, 45 ve 50 müşterinin yer aldığı problemlerin bir kısmında ise, program hafıza hatası verdiği için optimal çözüme ulaşılamamıştır. Benzer şekilde, iki depolu durum için çözülen 405 problemin 390 tanesinde en iyi çözüme ulaşılmıştır. En iyi çözüme ulaşılamayan problemlerin bir kısmında hafıza hatası ile karşılaşmış olup, bir kısmında ise belirlenen 7200,00 s içerisinde en iyi çözüme ulaşılamadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak çözülen 810 tane problemin 739 tanesinde optimal çözüme ulaşılmış, kalan problemlerde ya hafıza hatası nedeniyle ya da 7200,00 s içerisinde çözüme ulaşılamadığından optimal sonuç elde edilememiştir.

Çizelge 3.1. Çok depolu ve tek depolu problemler için matematiksel modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Müşteri Sayısı	Problem Tipi	Araç Kapasitesi	Problem Sayısı	Tek Depolu			İki Depolu		
				EÇUPS	OÇS	YSD	EÇUPS	OÇS	YSD
10	x	Düşük	5	5	1,55	0,00	5	0,60	0,00
10	x	Orta	5	5	0,87	0,00	5	0,45	0,00
10	x	Yüksek	5	5	0,81	0,00	5	0,40	0,00
10	y	Düşük	5	5	1,47	0,00	5	1,45	0,00
10	y	Orta	5	5	1,11	0,00	5	0,92	0,00
10	y	Yüksek	5	5	0,93	0,00	5	0,80	0,00
10	z	Düşük	5	5	1,07	0,00	5	0,62	0,00
10	z	Orta	5	5	0,75	0,00	5	0,52	0,00
10	z	Yüksek	5	5	0,57	0,00	5	0,46	0,00
15	x	Düşük	5	5	55,91	0,00	5	20,03	0,00
15	x	Orta	5	5	20,05	0,00	5	9,41	0,00
15	x	Yüksek	5	5	9,12	0,00	5	0,90	0,00
15	y	Düşük	5	5	11,24	0,00	5	5,53	0,00
15	y	Orta	5	5	7,83	0,00	5	4,35	0,00
15	y	Yüksek	5	5	7,30	0,00	5	3,70	0,00
15	z	Düşük	5	5	11,24	0,00	5	9,75	0,00
15	z	Orta	5	5	9,56	0,00	5	7,43	0,00
15	z	Yüksek	5	5	6,15	0,00	5	3,85	0,00
20	x	Düşük	5	5	100,65	0,00	5	97,47	0,00
20	x	Orta	5	5	55,54	0,00	5	17,05	0,00
20	x	Yüksek	5	5	9,29	0,00	5	4,45	0,00
20	y	Düşük	5	5	39,60	0,00	5	35,66	0,00
20	y	Orta	5	5	34,56	0,00	5	19,37	0,00
20	y	Yüksek	5	5	12,35	0,00	5	11,18	0,00
20	z	Düşük	5	5	184,03	0,00	5	37,33	0,00
20	z	Orta	5	5	42,63	0,00	5	19,18	0,00
20	z	Yüksek	5	5	8,93	0,00	5	4,57	0,00
25	x	Düşük	5	4	1926,64	0,61	5	66,35	0,00
25	x	Orta	5	5	681,18	0,00	5	62,05	0,00
25	x	Yüksek	5	5	17,19	0,00	5	13,42	0,00
25	y	Düşük	5	3	2329,07	0,24	5	80,52	0,00
25	y	Orta	5	5	1255,01	0,00	5	28,33	0,00
25	y	Yüksek	5	5	132,33	0,00	5	9,31	0,00
25	z	Düşük	5	3	2091,89	0,69	5	259,80	0,00
25	z	Orta	5	5	1172,08	0,00	5	45,31	0,00
25	z	Yüksek	5	5	470,86	0,00	5	18,69	0,00

Çizelge 3.1. (devam) Çok depolu ve tek depolu problemler için matematiksel modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Müşteri Sayısı	Problem Tipi	Araç Kapasitesi	Problem Sayısı	Tek Depolu			İki Depolu		
				EÇUPS	OÇS	YSD	EÇUPS	OÇS	YSD
30	x	Düşük	5	5	762,79	0,00	5	100,21	0,00
30	x	Orta	5	5	189,12	0,00	5	20,38	0,00
30	x	Yüksek	5	5	162,47	0,00	5	18,40	0,00
30	y	Düşük	5	4	1700,73	0,08	5	168,87	0,00
30	y	Orta	5	5	1188,84	0,00	5	20,63	0,00
30	y	Yüksek	5	5	357,17	0,00	5	66,35	0,00
30	z	Düşük	5	5	1694,18	0,00	5	253,62	0,00
30	z	Orta	5	5	1302,16	0,00	5	73,86	0,00
30	z	Yüksek	5	5	909,47	0,00	5	25,78	0,00
35	x	Düşük	5	3	3368,38	2,80	5	623,39	0,00
35	x	Orta	5	5	224,59	0,00	5	54,74	0,00
35	x	Yüksek	5	5	20,21	0,00	5	21,13	0,00
35	y	Düşük	5	5	1591,73	0,00	5	364,49	0,00
35	y	Orta	5	5	373,66	0,00	5	66,88	0,00
35	y	Yüksek	5	5	37,81	0,00	5	25,53	0,00
35	z	Düşük	5	3	3146,60	1,92	5	553,44	0,00
35	z	Orta	5	5	603,15	0,00	5	56,47	0,00
35	z	Yüksek	5	5	26,04	0,00	5	13,08	0,00
40	x	Düşük	5	5	2960,48	0,00	4	872,55	0,14
40	x	Orta	5	5	1506,87	0,00	5	440,46	0,00
40	x	Yüksek	5	5	1431,63	0,00	5	385,83	0,00
40	y	Düşük	5	3	2478,56	0,60	5	1087,08	0,00
40	y	Orta	5	5	2041,39	0,00	5	394,82	0,00
40	y	Yüksek	5	5	1278,47	0,00	5	95,75	0,00
40	z	Düşük	5	3	4578,67	0,31	5	1403,74	0,00
40	z	Orta	5	5	1566,98	0,00	5	339,94	0,00
40	z	Yüksek	5	5	1404,30	0,00	5	186,51	0,00
45	x	Düşük	5	2	4833,04	3,54	5	1331,52	0,00
45	x	Orta	5	3	2909,39	0,72	5	554,47	0,00
45	x	Yüksek	5	5	3623,41	1,25	5	231,67	0,00
45	y	Düşük	5	1	4974,27	3,55	4	4361,91	0,37
45	y	Orta	5	4	3817,61	1,25	5	848,31	0,00
45	y	Yüksek	5	4	2246,45	0,11	5	797,37	0,00
45	z	Düşük	5	1	5071,50	5,40	4	2939,20	1,77
45	z	Orta	5	3	3750,86	1,31	5	1728,61	0,00
45	z	Yüksek	5	4	3121,43	0,29	5	1372,11	0,00

Çizelge 3.1. (devam) Çok depolu ve tek depolu problemler için matematiksel modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Müşteri Sayısı	Problem Tipi	Araç Kapasitesi	Problem Sayısı	Tek Depolu			İki Depolu		
				EÇUPS	OÇS	YSD	EÇUPS	OÇS	YSD
50	x	Düşük	5	2	1964,78	8,43	2	4222,27	0,85
50	x	Orta	5	1	2373,88	4,99	4	4625,00	0,12
50	x	Yüksek	5	4	2366,10	0,77	5	998,40	0,00
50	y	Düşük	5	1	3766,61	7,30	4	2284,53	1,26
50	y	Orta	5	2	2199,14	2,61	4	1660,35	0,53
50	y	Yüksek	5	3	3214,77	0,86	3	1490,98	1,01
50	z	Düşük	5	2	2573,10	6,88	3	3259,67	0,89
50	z	Orta	5	3	2723,16	4,57	4	1741,39	1,85
50	z	Yüksek	5	3	2565,18	3,27	4	2063,09	0,79

Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi, aynı matematiksel model kullanılarak depo sayısının değiştirilmesiyle çözülen problemler incelendiğinde, iki depolu durumda daha fazla test probleminde en iyi sonuca ulaşıldığı dikkat çekmektedir. Tek deponun yer aldığı sistemler için çözülen test problemleri incelendiğinde, ortalama çözüm süresi 0,57 ile 5071,50 s arasında değişmektedir. Çok depolu sistemlerin ortalama çözüm süresi ise 0,40 ile 4625,00 s arasında değişiklik göstermektedir. Ayrıca Çizelge 3.1 incelendiğinde genellikle, iki deponun yer aldığı test problemlerinin çözüm süresinin daha düşük olduğu yani iki deponun yer aldığı problemlerde daha kısa sürede en iyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir.

Sonuç olarak, 810 test probleminin aynı matematiksel model ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlarda, iki deponun yer aldığı test problemlerinin çözümünde, tek depolu sistemlere göre, daha kısa sürede en iyi çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, iki depolu sistemlerde, hem daha fazla problemde en iyi çözüme ulaşıldığı, hem de ortalama yüzde sapma değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aynı özellikteki problemlerin tek depolu ve iki depolu olarak çözüldüğünde, iki deponun yer aldığı test problemlerinde daha iyi amaç fonksiyonu değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Sonuç olarak, iki depolu test problemlerinde, tek depolu test problemlerine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Modelin etkinliğinin analiz edilmesinde ilk aşamada problemlerin cözümünde 7200,00 s kısıtı dikkate alınarak, GAMS 24.1.3. programında cözölerek elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. İkinci aşamada ise 7200,00 s içerisinde cözölemeyen problemler tespit edilerek, bu problemler yeniden GAMS 24.1.3 programında kodlanarak, süre kısıtı dikkate alınmadan yeniden cözölmüştür. İlk aşamada cözölen problemler incelendiğinde, tek depolu problemlerde 25 ve üzeri müşteri sayısı bulunduğunda 7200,00 s içerisinde eniyi cözöme ulaşamayan problemlerin yer aldığı tespit edilmiştir.

Süre kısıtı dikkate alınmadan cözölen problemler sonucunda, tek depolu sistemlerde 405 adet problemten 366 adedinde eniyi sonuca ulaşılmış olup, kalan problemlerin cözümünde ise kapasite hatası ile karşılaşıldığından eniyi cözöme ulaşılamamıştır. İki depolu problemlerde ise 40 ve üzerinde müşterinin yer aldığı problemlerde 7200,00 s’de eniyi cözöme ulaşamayan problemlerin bulunduğu analiz edilmiştir. İki depolu problemlerin ise süre kısıtlaması olmadan cözölmesinde 405 adedin 392’sinde eniyi cözöme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Kalan problemlerin cözümünde ise kapasite hatası yaşandığından dolayı eniyi cözöme ulaşılamamıştır.

Süre kısıtlaması kaldırarak 25 müşterili tek depolu problemler için yeniden cözüm yapıldığında cözüm süresinin araç kapasitesi ve problem türüne göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiş olup, ortalama cözüm süresinin 17,19 s ile 2552,47 s aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Beklenildiği gibi zaman kısıtlaması olmadığı için ortalama cözüm süresinde artış yaşanmıştır. Diğer taraftan zaman kısıtlaması altında cözölen 45 problemten 40 tanesinde eniyi cözöme ulaşıldığı tespit edilmişken, süre kısıtlaması olmadığı takdirde tüm problemlerde eniyi cözöme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca süre kısıtlaması altında 25 müşterili problemlerde YSD 0,69 değerini bulurken, süre kısıtlaması olmadan da bu değerin %0,00’a düştüğu tespit edilmiştir.

30 müşterili tek depolu problemler süre kısıtlaması olmadan yeniden cözöldüğünde ortalama cözüm süresinin artış göstererek 20,21 ile 11955,22 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca YSD’nin de beklenildiği şekilde %2,80’den %0,25’e düştüğu tespit edilmiştir. Süre kısıtlaması altında cözölen problemlerin 41’inde eniyi cözöme ulaşılmışken, süre kısıtlaması olmadan cözölen problemlerin 44’ünde eniyi cözöme ulaşılmıştır.

35 müşteriye tek depolu problemlerde süre kısıtlaması olmadan ortalama çözüm süresinin 162,47 ile 1694,18 aralığında olduğu görülmüştür. Ayrıca süre kısıtlaması olduğunda 45 problemin 44 tanesinde eniyi çözümü ulaşılmışken, süre kısıtlaması kaldırıldığında tüm problemlerde eniyi çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca YSD'nin de %0,08'den %0,00'a düştüğü analiz edilmiştir.

40 müşteriye problemlerde hem tek depolu durumda hem de iki depolu durumda 7200,00 s içerisinde eniyi sonucu ulaşamayan problemlerin olduğu görülmüştür. 40 müşteriye tek depolu problemlerin çözüm süresinin 1278,47 s ile 13470,13 s aralığında değiştiği tespit edilmiş olup, çözülen problemlerin 45 tanesinde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Ayrıca YSD süre kısıtlaması altında %0,60 iken süre kısıtlaması olmadığında bu değer sıfıra düşmüştür. İki depolu durumda çözülen 45 problemin tümünde eniyi çözüme ulaşılmışken ortalama çözüm süresinin ise 186,51-1403,74 s aralığında değiştiği dikkat çekmektedir. Ayrıca YSD değeri süre kısıtlaması altında %0,14 olduğu problem türü yer alırken süre kısıtlaması dikkate alınmadığı takdirde bu oranın tüm problemlerde 0 olduğu görülmüştür.

45 müşteriye problemlerde de hem tek depolu hem de iki depolu durumda süre kısıtlaması nedeniyle eniyi çözüme ulaşamayan problemlerin olduğu tespit edilmiştir. Bu problemler süre kısıtlaması dikkate alınmadan yeniden çözüldüğünde tek depolu problemlerde ortalama çözüm süresinin 3121,45 ile 20633,65 aralığında değiştiği, iki depolu problemlerde ise 231,67 ile 2372,11 aralığında değiştiği görülmüştür. Ayrıca YSD değerinin tek depolu sistemlerde en yüksek %4,66 olarak, iki depolu sistemlerde ise %1,77 olarak hesaplanmıştır. Süre kısıtlaması altında tek depolu sistemlerde 45 problemde 27 tanesinde eniyi çözüme ulaşılmışken, problemler süre kısıtlaması olmadan çözüldüğünde ise 33 adet problemde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Çok depolu problemlerde ise süre kısıtlaması altında 43 problemde eniyi çözüme ulaşılmışken, süre kısıtlaması olmadan 44 problemde eniyi çözüme ulaşılmıştır.

Son olarak 50 müşteriye tek depolu problemlerde ortalama çözüm süresinin 1964,78-7207,96 aralığında değiştiği, çok depolu problemlerde ise 998,90-6641,88 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Tek depolu problemlerde süre kısıtlaması altında olduğu gibi 45 problemde 21 tanesinde eniyi çözüme ulaşıldığı, diğer problemlerin çözümünde kapasite hatası ile karşılaşıldığı görülmüştür. Bu yüzden de YSD'lerinin genelde yüksek olduğu, en fazla YSD'nin ise %8,43 olarak hesaplandığı tespit edilmiştir. Çok depolu problemlerde

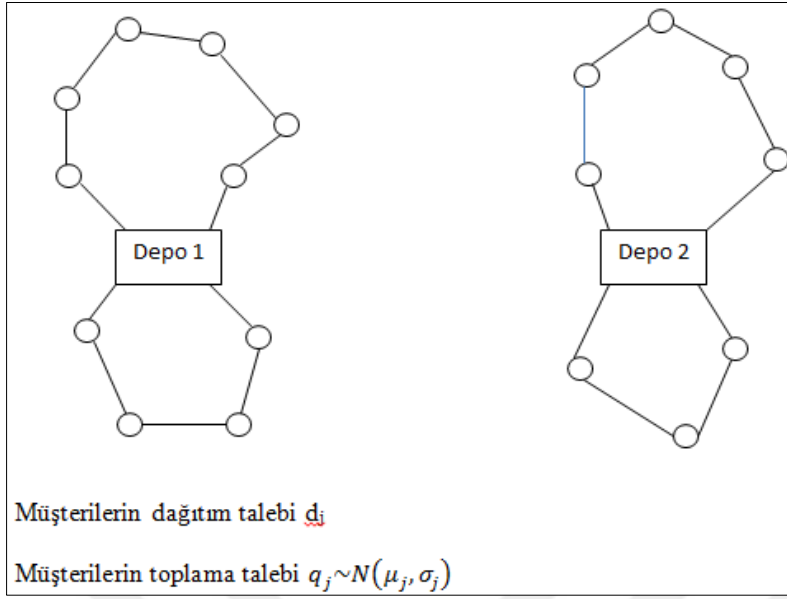
ise süre kısıtlaması altında çözülen 45 problemin 33 tanesinde eniyi çözüme ulaştığı görülmüşken, süre kısıtlaması olmadan çözülen problemlerden 34 tanesinde eniyi çözüme ulaşıldığı dikkat çekmektedir. Ayrıca YSD değerlerinin de süre kısıtlaması altında çözülen problemlere göre daha düşük olduğu ve maksimum %1,85 olarak hesaplandığı tespit edilmiştir.

Süre kısıtlaması dikkate alınmadan problemlerin çözülmesi sonucunda, beklenildiği gibi, ortalama çözüm süresinde bir artış yaşanmıştır. Diğer taraftan YSD oranları için düşüş olurken, eniyi çözüme ulaşan problem sayısında da artış olmuştur. Çözüm sonuçları analiz edildiğinde dikkat çeken diğer bir konu ise ortalama çözüm sürelerinin çok depolu problemlerin, tek depolu problemlere göre daha düşük olduğudur. Bu durum ile paralel olarak çok depolu problemlerde eniyi çözüme ulaşan problem sayısının da tek depolu problemlere göre daha fazla olduğu tespit olmuştur. Ayrıca çok depolu problemlerin çözümünde elde edilen yüzde sapma değerinin de tek depolu problemlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

3.3. STT_ÇD_ETDARP İçin Geliştirilen Modelin Varsayımları

Önerilen matematiksel modelin geliştirilmesinde aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

1. Her araç hareketine depoda başlar ve rota sonunda aynı depoya geri döner.
2. Müşterilerin dağıtım talepleri önceden bilinmekte olup, toplama talepleri ise bir olasılık dağılımından gelen rassal değişkenlerdir.
3. Depolara atanan müşteri taleplerinin toplamı, atandıkları deponun kapasitesini aşamaz.
4. Rota boyunca her müşteriye bir araçla yalnız bir kere hizmet verilir.
5. Her rotada yer alan müşterilerin toplam talebi, araç hareketine devam ederken herhangi bir noktada aracın kapasitesini aşamaz.
6. Amaç, toplam rotalama maliyetinin minimize edilmesidir.
7. Müşterilerin dağıtım ve toplama talepleri aynı araçla eş zamanlı olarak karşılanmaktadır.
8. Müşterilerin toplama talepleri birbirinden bağımsız olarak belirlenir.
9. Tüm araçlar homojendir ve eşit kapasiteye sahiptir.
10. Müşterilere birden fazla depodan hizmet verilmektedir.
11. Araçların birim taşıma maliyetleri önceden bilinmektedir ve sabittir.



Şekil 3.2. Stokastik toplama talepli ÇD_ETD_ARP için örnek şebeke

Bu çalışmada, müşterilerin toplama taleplerinin birbirinden bağımsız olduğu ve ortalaması μ_i ile varyansı σ_i^2 $\forall i \in I$ için normal dağılıma sahip değişkenlerden oluştuğu kabul edilmiştir [18]. Şekil 3.2’de STT_ÇD_ETDARP için oluşturulan örnek şebeke verilmiştir.

3.4. STT_ÇD_ETDARP İçin Önerilen Matematiksel Model

Örnekleme bilgisi, uzun zamandır iş dünyasında doğrusal olarak kısıtlanmış sistemlerde fonksiyonel katsayıların beklenen değerini belirlemede yararlanılan bir yöntemdir. Örneklemlerin ortalama değerlerinin yanında varyans bilgisinin eklenmesi de katsayı değerlerinin tahminine dayandığından daha eksiksiz bir analiz sağlayacaktır. Örnekleme bilgisine dayanan stokastik fonksiyonlar için şans kısıtları genellikle normal dağılımı sağlamaktadır [249].

Büyük sayılar yasası, bir rassal değişkenin uzun vadedeki kararlılığını göstermektedir. Bir örneklemdaki gözlem sayısı arttıkça elde edilen değerlerin ortalamaya yakınsadığı görülmektedir. Merkezi limit teoremine göre fazla sayıdaki bağımsız ve aynı dağılımı gösteren rassal değişkenlerin aritmetik ortalamasının yaklaşık olarak normal dağılım gösterecektir. Merkez limit teoreminin temel prensibi uygun şartlar altında seçilen bir örneklemin popülasyona benzeyeceğidir. Eğer seçilen örnekleme ortalama ve standart sapmaları ile ilgili bilgi mevcutsa, örneklemin alındığı popülasyonla ilgili net çıkarımlarda

bulunulabilir. Alınan örnekleminin normal dağılıma uyması için alındığı popülasyonun normal dağılımı sağlamasına gerek yoktur [250].

Literatürdeki STARP ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, modelin oluşturulmasında CCP yaklaşımının kullanıldığı çalışmalarda, müşteri taleplerinin normal dağılımı sağladığını varsaydıkları tespit edilmiştir [18, 50, 117]. Bu yüzden bu çalışmada da, büyük sayılar yasası ile merkezi limit teoremi dikkate alınarak stokastik bilginin yer aldığı toplama taleplerinin normal dağılımı sağladığı varsayılmıştır.

Toplama taleplerinin normal olasılık dağılımına uyduğu varsayımı altında geliştirilen matematiksel modelin amacı, rotalardaki müşterilerin toplama talepleri ile dağıtım taleplerinin toplamının, o rotaya atanan aracın kapasitesi Q 'nun aşılmamasını ve araçta taşınan yükün toplanan yük alt sınır değeri ile üst sınır değerinin aşılmamasını sağlamaktır. Belirlenen sınırlar veya olasılık seviyesi altında kalacak şekilde ($P \leq \alpha$) minimum rota uzunluğu elde edilmeye çalışılmıştır [18, 50, 117]. Burada müşterilerin dağıtım taleplerinin önceden kesin olarak bilindiği, yani deterministik olduğu, toplama taleplerinin ise normal olasılık dağılımına sahip rassal değişkenlerden oluştuğu varsayılmıştır.

q_i : i müşterisinin toplama talebini temsil eden rassal değişkeni göstermektedir ve $q_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), i \in N_c$ şeklinde kabul edilmektedir. Problemden toplama taleplerinin stokastik olduğu ve normal dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. Bu yüzden toplama taleplerinin yer aldığı kısıtlar için düzenleme yapılmıştır.

$$V_i \geq q_i + \sum_{j \in N_c} q_j x_{ji} \quad \forall i \in N_c \ i \neq j \quad (3.14)$$

Araç i müşterisine gelene kadar üzerinde yer alan toplama taleplerinin toplamını belirleyen Eş. 3.14 aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Burada toplama taleplerinin normal dağılıma sahip rassal değişken olduğu kabul edilmiştir.

$$q_i + \sum_{j \in N_c} q_j x_{ji} \leq V_i \quad \forall i \in N_c \ i \neq j \quad (3.24)$$

Toplama talepleri $q_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), i \in N_c$ ve $q_j \sim N(\mu_j, \sigma_j^2), j \in N_c$ şeklinde yazabiliriz. $i \neq j$ olmak üzere, j müşterisine gidene kadarki toplama taleplerinin toplamına X dersek; $X = \sum_{j \in N_c} q_j$ olur ve $X \sim N\left(\sum_{j \in N_c} \mu_j, \sqrt{\sum_{j \in N_c} \sigma_j^2}\right), j \in N_c$ olur.

Stokastik normal dağılıma sahip değişkenlerin toplamı da normal dağılıma sahip olacağı için, kısıttaki taleplerin toplamı değişkeni Eş. 3.25'teki gibi yazılabilir.

$$q_i + \sum_{j \in N_c} q_j \sim N\left(\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j, \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_c} \sigma_j^2}\right) \quad (3.25)$$

Literatürdeki çalışmalarda, CCP yaklaşımında, taleplerin normal dağılımı sağladığı varsayılmıştır. Buna göre kısıtları CCP yaklaşımına göre düzenlemek için, Eş. 3.26'da verilen dönüşüm yapılmalıdır:

$$P(Z \leq Z_{1-\alpha}) = 1 - \alpha \quad (3.26)$$

Eş. 3.26'a göre gerekli düzenlemeleri yaptığımızda ilgili kısıt Eş. 3.27'ye dönüşür:

$$P\left(Z \leq \frac{V_i - (\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_c} \sigma_j^2}}\right) \geq 1 - \alpha \quad \forall i \in N_c \quad i \neq j \quad (3.27)$$

Eş. 3.27 üzerinde normal dağılıma ilişkin dönüşümler yapıldığında, Eş. 3.28 elde edilir:

$$Z_{1-\alpha} \leq \frac{V_i - (\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_c} \sigma_j^2}} \quad \forall i \in N_c \quad i \neq j \quad (3.28)$$

Buna göre, stokastik değişken içeren kısıt Eş. 3.29'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur:

$$\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_c} \sigma_j^2} \leq V_i \quad \forall i \in N_c \quad i \neq j \quad (3.29)$$

3.29 numaralı kısıta x_{ij} 0-1 değişkeni eklendiğinde toplama talepleri toplamı için yeni üst sınır kısıtı elde edilir. Bu durumda Eş. 3.14 yerine Eş. 3.30'da verilen kısıt kullanılır.

$$\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j x_{ji} + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_c} \sigma_j^2 x_{ji}} \leq V_i \quad \forall i \in N_c \quad i \neq j \quad (3.30)$$

Eş. 3.15 dağıtım yükü toplamının, dağıtım yükü karar değişkeninin alt sınırının aşılmasını engellemektedir.

$$V_i \leq Q - (Q - q_i) \left(\sum_{k \in N_s} x_{ki} \right) \quad \forall i \in N_c \quad (3.15)$$

Toplama taleplerinin stokastik olduğu varsayımı altında dönüşümü gerçekleştirebilmek için, kısıt Eş. 3.31'de verildiği gibi düzenlenebilir.

$$q_i * \sum_{k \in N_s} x_{ki} \geq V_i + Q * \sum_{k \in N_s} x_{ki} - Q \quad \forall i \in N_c \quad (3.31)$$

Burada normal dağılımı sağlayan toplama talepleri, $Z = \frac{x - \mu_i}{\sqrt{\sigma_i^2}}$ dönüşümü ile $Z \sim (0,1)$

normal değişkenine dönüşür. Buna göre gerekli dönüşümler gerçekleştirilerek Eş. 3.32 oluşturulur:

$$Z_{1-\alpha} \geq \frac{(V_i + Q * \sum_{k \in N_s} x_{ki} - Q) - \mu_i}{\sqrt{\sigma_i^2}} \quad \forall i \in N_c \quad (3.32)$$

Gerekli işlemler gerçekleştirildikten sonra kısıt, Eş. 3.33'te gösterildiği gibi düzenlenebilir:

$$\mu_i + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2} \geq V_i - Q \sum_{k \in N_s} x_{ki} - Q \quad \forall i \in N_c \quad (3.33)$$

3.33 numaralı kısıt x_{ij} 0-1 değişkeni eklendiğinde Eş. 3.34 elde edilir ve bu kısıt matematiksel modelde Eş. 3.15'in yerine kullanılır.

$$Q - Q \sum_{k \in N_s} x_{ki} + \mu_i \sum_{k \in N_s} x_{ki} + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2 \sum_{k \in N_s} x_{ki}} \geq V_i \quad \forall i \in N_c \quad (3.34)$$

Eş. 3.11 numaralı kısıt toplama taleplerinin araç kapasitesinin aşılmasını engellemektedir.

$$V_i - V_j + Q * x_{ij} + (Q - q_j - q_i) * x_{ji} \leq Q - q_j \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (3.11)$$

Normal dağılıma dönüşümü ile Eş. 3.11, Eş. 3.35'te gösterildiği şekilde düzenlenebilir:

$$q_j - q_j * x_{ji} - q_i x_{ji} \leq Q - V_i + V_j - Q x_{ij} - Q x_{ji} \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (3.35)$$

Toplama talepleri q_i ve q_j , $q_i, q_j \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), i \in N_c$ iken $X = q_i$ i müşterisinin toplama talebi olarak alınırsa $q_i + q_j \sim N(\mu_i + \mu_j, \sigma_i^2 + \sigma_j^2)$ olur. Stokastik normal dağılıma sahip değişkenlerin toplamı da normal dağılıma sahip olur. Bu durumda, stokastik kısıt için aşağıda verilen Z normal dağılım dönüşümü uygulanabilir:

$$Z_{1-\alpha} \leq \frac{[Q - V_i + V_j - Q * x_{ij} - Q * x_{ji}] - [\mu_j - \mu_j x_{ji} - \mu_i x_{ji}]}{\sqrt{\sigma_j^2 - \sigma_j^2 x_{ji} - \sigma_j^2 x_{ji}}} \quad \begin{matrix} i \neq j \\ \forall i, j \in N_c \end{matrix} \quad (3.36)$$

Kısıt üzerinde gerekli işlemler yapıldığında, söz konusu kısıt aşağıdaki hale dönüşür:

$$\mu_j - x_{ji}(\mu_j + \mu_i) + Z_{1-\alpha} \left(\sqrt{\sigma_j^2 - x_{ji}(\sigma_j^2 + \sigma_i^2)} \right) \leq Q(1 - x_{ij} - x_{ji}) - V_i + V_j \quad (3.37)$$

4. STT_ÇD_ETDARP İÇİN GELİŞTİRİLEN MODELİN ETKİNLİĞİNİN TEST EDİLMESİ

Önceki bölümde toplama taleplerinin stokastik olduğu varsayımı altında, deterministik ÇD_ETD_ARP'nin matematiksel modeli kullanılarak, stokastik bilginin yer aldığı kısıtlar belirlenmiştir. Daha sonra bu kısıtlardaki stokastik bilgiler için şans kısıtlı stokastik programlama yaklaşımı kullanılarak Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (STT_ÇD_ETDARP) için matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model incelendiğinde, modelde stokastik talebin yer aldığı kısıtların doğrusal olmayan ifadeler içerdiği dikkat çekmektedir. Bu bölümde bu husus dikkate alınarak geliştirilen matematiksel modelin etkinliği analiz edilmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde doğrusal olmayan model, literatürde yer alan doğrusallaştırma yöntemlerinden yararlanılarak doğrusal hale getirilmiştir. Doğrusal hale getirilen model, oluşturulan test problemleri kullanılarak GAMS CPLEX solver eklentisi ile çözülmüştür. Bölümün sonlarında ise doğrusal hale dönüştürülen model farklı boyuttaki test problemleri ile çözülerek modelin etkinliği analiz edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Stokastik Modelin Doğrusal Hale Getirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler

STT_ÇD_ETDARP için geliştirilen matematiksel model incelendiğinde, modelin doğrusal olmayan kısıtlara sahip olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, şans kısıtlı programlamanın kullanıldığı doğrusal olmayan modellerin doğrusal hale dönüştürülmesinde, doğrusal dönüşüm metodu, ayrık programlama metodu ve doğrusal yaklaşım metodunun kullanıldığı görülmektedir. Bu bölümde de önce bu yöntemler hakkında bilgi verilmiş daha sonra ise geliştirilen model doğrusal yaklaşım metodu ile doğrusal hale getirilmiştir.

4.1.1. Ayrık programlama metodu

Ayrık Programlama tekniği ilk kez Miller tarafından formüle edilmiştir [251]. Ayrık programlama, doğrusal olmayan fonksiyonları çözebilmek için kullanılır ve bu fonksiyonları ayırmak için kolayca uygulanabilir [252]. Ayrık programlama, bazı doğrusal olmayan programlama problemlerinin çözümlerini elde etmek için, amaç fonksiyonu ve

kısıtlardan her birinin işlevini toplam olarak ifade edebilen özel bir yöntemdir. Ayrık programlama, doğrusal olmayan programlama problemlerinin optimal çözümünü bulmayı garanti etmez, orjinal probleme yalnızca yaklaşık bir çözüm bulur. Ayrık programlama tekniği ile doğrusal olmayan probleme yaklaşık bir çözüm bulabilmek için, ayrılabilir amaç fonksiyonu ile ayrılabilir kısıtlar, parçalı doğrusal fonksiyonlar ile değiştirilir. Daha sonra, doğrusal bir programlama modeli elde edilir ve bu model, orijinal doğrusal olmayan probleme yaklaşık bir çözüm bulabilmek için kullanılır [18]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, stokastik programlama modellerinin doğrusal hale getirilmesinde, özellikle de stokastik araç rotalama problemlerinin, stokastik montaj hattı dengeleme problemlerinin vb. matematiksel modellerinin doğrusal hale dönüştürülmesinde bu yöntemin kullanıldığı dikkat çekmektedir [18, 50, 117].

Ayrık programlama yaklaşımı, doğrusal olmayan kısıt içeren problemlerin çözümünde optimal çözüm bulmayı garantilememekte ancak problem için optimale yakın bir çözüm bulabilmektedir. Bulunan çözümden daha iyi sonuçlar elde edebilmek için ise, ayrılabilir fonksiyonlar ile parçalı doğrusal fonksiyonlar yer değiştirir. Doğrusal olmayan programlama problemlerinin, ayrık programlama yaklaşımı ile doğrusal hale getirebilmek için parçalı doğrusal fonksiyon yaklaşımı kullanılmaktadır. Huang tarafından yapılan çalışmada, parçalı doğrusal fonksiyon yaklaşımı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir [253].

Doğrusal olmayan modele, ayrık programlama yaklaşımının uygulanabilmesi için, fonksiyonun tek değişkenli fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilmesi gerekmektedir [253]. Bu yüzden, STT_ÇD_ETDARP için geliştirilen matematiksel modelde, birden fazla karar değişkeni yer aldığından dolayı, söz konusu matematiksel modelin doğrusal hale dönüştürülmesi için ayrık programlama metodu kullanılamamıştır.

4.1.2. Doğrusal dönüşüm metodu

Doğrusal dönüşüm metodunda, doğrusal olmayan kısıtların her iki tarafının da karesi alınarak kısıtların doğrusal hale getirilmesi sağlanmaktadır. Doğrusal dönüşüm metodu uygulanarak elde edilen denklemler ile hesaplama yapıldığında matematiksel modele yaklaşık bir çözüm bulunmaktadır. Şans Kısıtlı Stokastik Programlama modelinin doğrusal olmayan kısıtlarını doğrusal hale dönüştürmek için kullanılan doğrusal dönüşüm metodu Ağpak ve Gökçen tarafından geliştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, stokastik

çevrim zamanlı U tipi montaj hattı dengeleme problemini şans kısıtlı stokastik programlama ile modellemişler ve doğrusal olmayan kısıtları doğrusal hale getirmek için geliştirdikleri doğrusal dönüşüm metodunu kullanmışlardır [254].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, doğrusal dönüşüm metodunun, stokastik durumun bulunduğu montaj hattı dengeleme, araç rotalama problemleri gibi stokastik programlama modellerinin doğrusal hale dönüştürülmesin kullanıldığı tespit edilmiştir [50, 117, 254, 255].

Doğrusal dönüşüm metodu, köklü ifade yer aldığından dolayı doğrusal olmayan kısıtların doğrusal hale getirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Burada köklü ifadenin yer aldığı kısıtta her iki tarafın da karesi alınıp köklü ifade kaldırılarak model doğrusal hale getirilmektedir. Ancak değişkenlerin birbiri ile çarpılmasında dolayı, model doğrusal olmayan bir yapıya dönüşmektedir. Bu kısıtları doğrusal hale dönüştürmek için $x_{ij} * x_{nj} = u_{inj}$ kabulü yapılarak modele aşağıdaki kısıtların eklenmesi gerekmektedir [254].

$$x_{ij} * x_{nj} = u_{inj} \quad (4.1)$$

$$x_{ij} + x_{nj} - u_{inj} \leq 1 \quad (4.2)$$

$$x_{ij} + x_{nj} - 2u_{inj} \geq 0 \quad (4.3)$$

Modelde köklü ifadelerin yer aldığı kısıtların karesi alınarak oluşturulan kısıtlar ile modele yukarıda verilen kısıtlar eklenerek doğrusal olmayan model, doğrusal hale dönüştürülür.

Doğrusal dönüşüm metodu yaklaşık bir çözüm bulmaktadır, ancak çözüme ulaşması çok uzun sürmektedir. Hatta bu yöntem uygulanarak doğrusal hale dönüştürülmüş matematiksel modellerde, kısıt sayısı arttığı zaman, orta boyuttaki problemlerde bile 48 saatte çözüme ulaşamadığı tespit edilmiştir [50].

4.1.3. Doğrusal yaklaşım metodu

Olson ve Swenseth, doğrusal olmayan şans kısıtlı programlama modellerini doğrusal hale dönüştürmek için doğrusal yaklaşım metodunu geliştirmişlerdir [249]. Doğrusal Yaklaşım Metodu (Linear Approximation), doğrusal olmayan matematiksel modellerin doğrusal hale

dönüştürülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde şans kısıtlı programlamanın kullanıldığı matematiksel modellerin doğrusal hale dönüştürülmesi için bu yaklaşımın yaygın şekilde kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu formülasyon, sürekli şans kısıtlı modellere yaklaşık bir çözüm bulmaktadır [249].

Doğrusal Yaklaşım Metodu aşağıda verilen kısıt dikkate alınarak uygulanmaktadır:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \leq \sum_{i=1}^n a_i \quad a_i \in R^+ \quad (4.4)$$

Doğrusal olmayan matematiksel modele bu yöntem uygulandığında, modelin doğrusal olmayan bileşenleri doğrusal hale gelir. Modelin son formunda, büyük ölçekli problemler için üst limitler elde edilebilir. Bu yaklaşım, basit matematiksel eşitsizliklerde ve modele yeni bir değişken veya kısıt eklenmediğinde kullanılabilir [254,255].

Doğrusal dönüşüm metodunda, küçük boyuttaki problemlerde çözüme çok uzun sürede ulaşılmaktadır. Doğrusal yaklaşım metodu ise kısa sürede optimale yakın sonuç bulabilmektedir. Baykoç ve İşleyen, STARP'nin doğrusal olmayan matematiksel modelini doğrusal hale dönüştürmek için doğrusal yaklaşım metodu ile doğrusal dönüşüm metodunu kullanmışlar ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Aynı verileri içeren 8 müşteri test problemini çözdüklerinde, doğrusal dönüşüm metodu modelinin GAMS programında yapılan çözümünün 48 saat sonrasında sonlandırıldığı ve elde edilen çözümün ise doğrusal yaklaşım metodu ile doğrusallaştırılan modelin 14 saniyede bulduğu çözüm ile aynı olduğunu tespit etmişlerdir [50]. Günümüzde incelenen gerçek hayat problemlerinde de hızlı bir şekilde karar verilmesi gerektiğinden kısa zamanda problemlerin çözümüne ulaşılabilmesi önemli bir kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada doğrusal olmayan stokastik modelin doğrusal hale getirilmesinde, hızlı bir şekilde optimale yakın çözüm bulabilen doğrusal yaklaşım metodu kullanılmıştır.

4.2. Geliştirilen Modele Doğrusal Yaklaşım Metodunun Uygulanması

Stokastik Toplama Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (STT_ÇD_ETDARP) için geliştirilen matematiksel modelde yer alan stokastik kısıtlar aşağıda verildiği gibidir:

$$\mu_i + \sum_{j \in N_C} \mu_j x_{ji} + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_C} \sigma_j^2 x_{ji}} \leq V_i \quad \forall i \in N_C \quad i \neq j \quad (3.30)$$

$$\mu_i \sum_{k \in N_S} x_{ki} + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2 \sum_{k \in N_S} x_{ki}} \geq V_i - Q \sum_{k \in N_S} x_{ki} - Q \quad \forall i \in N_C \quad (3.34)$$

$$\mu_j - x_{ji}(\mu_j + \mu_i) + Z_{1-\alpha} \left(\sqrt{\sigma_j^2 - x_{ji}(\sigma_j^2 + \sigma_i^2)} \right) \leq Q(1 - x_{ij} - x_{ji}) - V_i + V_j \quad (3.37)$$

Eş. 3.30, Eş. 3.34 ve Eş. 3.37 numaralı kısıtlar incelendiğinde bu kısıtların doğrusal olmayan $\sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{j \in N_C} \sigma_j^2 x_{ji}}$, $\sqrt{\sigma_i^2 \sum_{k \in N_S} x_{ki}}$, $\sqrt{\sigma_j^2 - \sigma_j^2 x_{ji} - \sigma_i^2 x_{ji}}$ ifadelerini içerdiği dikkat çekmektedir. Bu bölümde bu ifadeleri doğrusal hale dönüştürebilmek için doğrusal yaklaşım metodu uygulanmıştır.

Olson ve Swenseth CCP modellerini doğrusal hale getirmek için hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilen Doğrusal Yaklaşım Metodunu geliştirmişlerdir. Literatürde de CCP yaklaşımı ile matematiksel modelleri oluşturulan araç rotalama problemlerinde, montaj hattı dengeleme problemlerinde bu yöntem kullanılarak doğrusal olmayan modellerin doğrusal hale getirildiği görülmektedir [18, 50, 253, 254].

Bu çalışmada modelin doğrusal hale getirilmesinde Olson ve Swenseth tarafından geliştirilen Doğrusal Yaklaşım Metodundan faydalanılmıştır. Buna göre doğrusal olmayan stokastik kısıtlar aşağıdaki şekilde doğrusal hale getirilmiştir. İlk olarak Eş. 3.30 numaralı kısıta doğrusal yaklaşım metodu uygulandığında kısıt Eş. 4.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir:

$$\mu_i + \sum_{j \in N_C} \mu_j x_{ji} + Z_{1-\alpha} \left(\sigma_i + \sum_{j \in N_C} \sigma_j x_{ji} \right) \leq V_i \quad \forall i \in N_C \quad i \neq j \quad (4.5)$$

Eş. 3.34 numaralı kısıta doğrusal yaklaşım metodu uygulandığında Eş. 4.6 elde edilmiştir:

$$\mu_i \sum_{k \in N_S} x_{ki} + Z_{1-\alpha} \left(\sigma_i \sum_{k \in N_S} x_{ki} \right) \geq V_i - Q \sum_{k \in N_S} x_{ki} - Q \quad \forall i \in N_C \quad (4.6)$$

Eş. 3.37 numaralı kısıta doğrusal yaklaşım metodu uygulandığında ise kısıt Eş. 4.7’de gösterilen şekle dönüşmüştür:

$$\mu_j - x_{ji}(\mu_j + \mu_i) + Z_{1-\alpha}(\sigma_j - x_{ji}(\sigma_j - \sigma_i)) \leq Q(1 - x_{ij} - x_{ji}) - V_i + V_j \quad \begin{matrix} \forall i, j \in N_C \\ i \neq j \end{matrix} \quad (4.7)$$

4.2.1. Doğrusal yaklaşım metoduyla doğrusallaştırılan matematiksel model

STT_ÇD_ETDARP için oluşturulan matematiksel model, daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, Eş.3.30, Eş.3.34 ve Eş.3.37 numaralı kısıtlarda doğrusal olmayan ifadeler içermektedir. Bu ifadeleri doğrusal hale getirebilmek için bir önceki bölümde doğrusal yaklaşım metodu uygulandığı belirtilmiştir. Doğrusal yaklaşım metodu kullanılarak elde edilen kısıtlar ile beraber yeni matematiksel model aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

Matematiksel Model

Amaç Fonksiyonu:

$$Enk Z = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad i \in N_C, i \neq j \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji} = \sum_{j \in N} x_{ij} \quad i \in N, i \neq j \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in N_C} x_{kj} = M_k \quad \forall k \in N_S \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N_c} x_{ik} = M_k \quad \forall k \in N_s \quad (3.5)$$

$$\sum_{k \in N_s} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_c \quad (3.6)$$

$$x_{ik} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.7)$$

$$x_{ki} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.8)$$

$$x_{ij} + y_{ik} + \sum_{\substack{m \in N_s \\ m \neq k}} y_{jm} \leq 2 \quad \forall i, j \in N_c, i \neq j, \forall k \in N_s \quad (3.9)$$

$$U_j - U_i + Q * x_{ij} + (Q - d_i - d_j) * x_{ji} \leq Q - d_i \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (3.10)$$

$$U_i + V_i - d_i \leq Q \quad \forall i \in N_c \quad (3.12)$$

$$U_i \geq d_i + \sum_{j \in N_c} d_j x_{ij} \quad i \neq j, \forall i \in N_c \quad (3.13)$$

$$U_i \leq Q - (Q - d_i) \left(\sum_{k \in N_s} x_{ik} \right) \quad \forall i \in N_c \quad (3.16)$$

$$\sum_{i \in N_c} d_i y_{ik} \leq B_k \quad \forall k \in N_s \quad (3.17)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (3.18)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_s \quad (3.19)$$

$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in N_c \quad (3.20)$$

$$V_i \geq 0 \quad \forall i \in N_c \quad (3.21)$$

$$M_k \geq 0 \quad \forall k \in N_s \quad (3.22)$$

$$\mu_i + \sum_{j \in N_c} \mu_j x_{ji} + Z_{1-\alpha} \left(\sigma_i + \sum_{j \in N_c} \sigma_j x_{ji} \right) \leq V_i \quad \forall i \in N_c \quad i \neq j \quad (4.5)$$

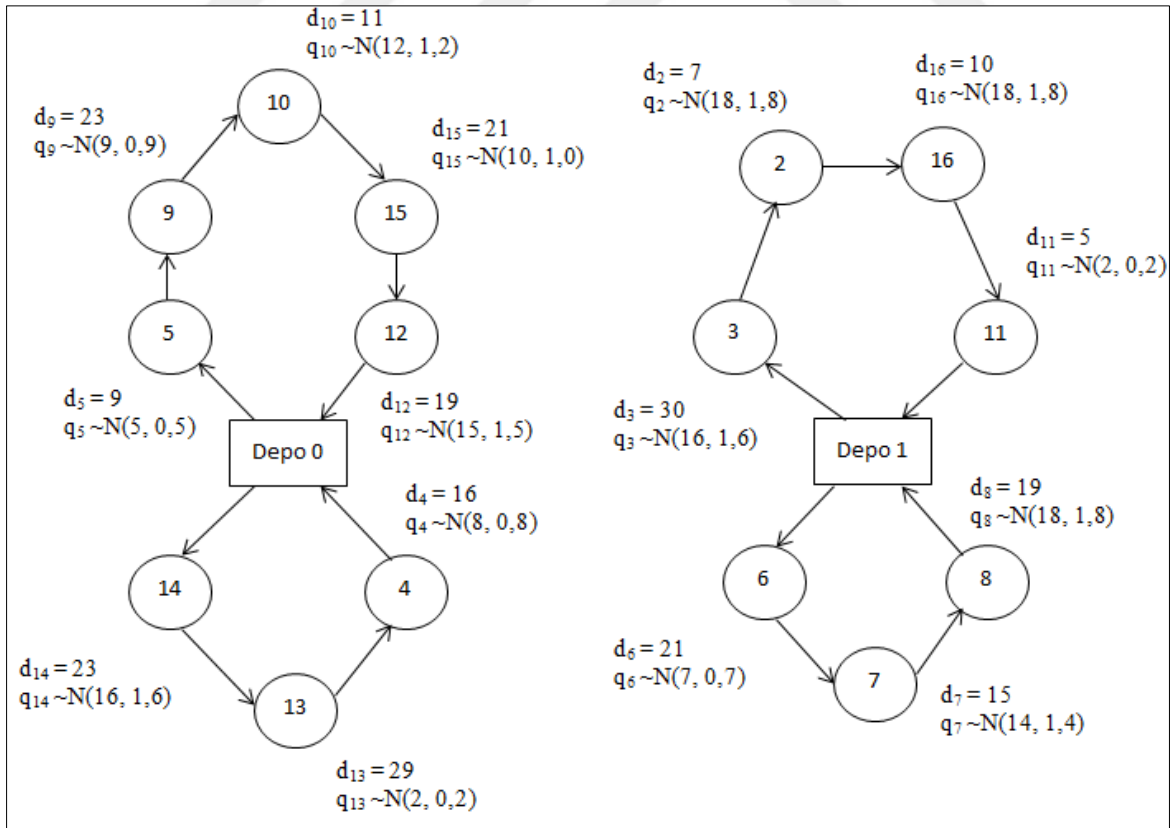
$$\mu_i \sum_{k \in N_s} x_{ki} + Z_{1-\alpha} \left(\sigma_i \sum_{k \in N_s} x_{ki} \right) \geq V_i - Q \sum_{k \in N_s} x_{ki} - Q \quad \forall i \in N_c \quad (4.6)$$

$$\mu_j - x_{ji}(\mu_j + \mu_i) + Z_{1-\alpha}(\sigma_j - x_{ji}(\sigma_j - \sigma_i)) \leq Q(1 - x_{ij} - x_{ji}) - V_i + V_j \quad \forall i, j \in N_c \quad i \neq j \quad (4.7)$$

Eş. [3.1-3.10], Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 ile Eş. [3.16-3.22] kısıtları 3. bölümde açıklandığı gibidir. Eş. 4.5, stokastik toplama taleplerinin belirlenen V_i değişkeninin üst sınırının belirli bir oranda aşılmasına izin veren şans kısıtlı V_i değişkeninin üst sınır kısıtıdır. Benzer

şekilde Eş. 4.6 V_i değişkeninin şans kısıt yaklaşımı ile oluşturulmuş alt sınır kısıtını göstermektedir. Eş. 4.7 ise, araç rotasına devam ederken araç üzerinde yer alan stokastik toplama taleplerinin kapasiteyi belirli bir oranda aşmasını sağlayan şans kısıtlı kapasite kısıtını göstermektedir. Ayrıca Eş. 4.7 alt turların oluşmasına da engel olmaktadır.

Doğrusal hale dönüştürülen matematiksel modelin analiz edilmesi için, Christofides ve Eilon'un önerdiği E-n51-k5 test problemi kullanılmıştır [246]. Bu test problemi müşterilere farklı lokasyonlarda yer alan 2 depodan hizmet verildiği ve 15 müşterinin yer aldığı sistem şeklinde ele alınmıştır. Müşterilerin dağıtım talepleri Salhi ve Nagy'nin önermiş olduğu formülasyon kullanılarak belirlenmiş, toplama talepleri ise, belirlenen formülasyon ile yapılan hesaplamalarda bulunan sonuçlar dikkate alınarak, toplama taleplerinin bulunduğu aralık belirlenmiş ve bu aralık baz alınarak rassal olarak üretilmiştir. Problemde araç kapasitesi toplama taleplerinin yarısı olan 85 birim olarak kabul edilmiş, standart sapma 0,1 olarak belirlenmiş ve güvenilirlik oranı yüksek müşteri memnuniyeti sağlamak için %97,5 olarak alınmıştır.



Şekil 4.1. Örnek problemin doğrusallaştırılmış model ile çözülmesinde elde edilen sonuçların şebeke üzerinde gösterilmesi

Doğrusal hale dönüştürülen matematiksel model GAMS 24.1.3 programına kodlanıp CPLEX 12.5.1.0 çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Problemin çözülmesiyle ulaşılan sonuçlar ile ortaya çıkan dağıtım ağı Şekil 4.1’de verilen şebekede gösterilmiştir. 15 müşteri ve 2 deponun yer aldığı test problemi için GAMS programında yazılan kod Ek 3’te sunulmuştur.

Şekil 4.1 incelendiğinde, 15 adet müşteriye 2 depodan hizmet verildiği, her 2 depodan da 2 adet aracın müşteri taleplerini karşılamak için depolardan hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca ulaşılan sonuçlar incelendiğinde tüm rota boyunca hiçbir noktada araçların kapasitesinin aşılmadığı tespit edilmiştir.

4.3. STT_ÇD_ETDARP İçin Test Problemlerinin Oluşturulması

STT_ÇD_ETDARP için literatürde test problemleri yer almadığından, bu bölümde stokastik toplama talebini dikkate alan test problemleri üretilmeye çalışılmıştır. Burada Christofides ve Eilon ile Augerat ve arkadaşlarının KARP için geliştirdiği test problemlerinden yola çıkılmıştır. Bu problemleri, ETD_ARP’ye dönüştürmek için Salhi ve Nagy’nin toplama ve dağıtım taleplerini belirlenmek için geliştirdikleri yöntem uygulanmış ve bu yöntemle elde edilen dağıtım talepleri, stokastik problemin de dağıtım talepleri olarak kabul edilmiştir. Toplama taleplerinin belirlenmesinde de stokastik talebin yer aldığı benzer problemlerdeki talebin oluşturulma yönteminden faydalanılmıştır. Buna göre, deterministik problemin toplama taleplerinin Salhi ve Nagy tarafından önerilen formülasyonla elde edilen toplama taleplerinin hangi aralık içerisinde yer aldığı dikkate alınmış ve toplama talepleri düzgün dağılımla rassal olarak bu aralık içerisinde üretilmiştir [48].

Stokastik problemde geliştirilen modelde standart sapmanın da belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. STT_ÇD_ETDARP için test problemleri oluşturulurken de literatürde benzer problemler için kullanılan yöntemden faydalanılmıştır [1,16,48]. Buna göre, modelin etkinliğini test edebilmek için, düşük, orta ve yüksek seviye olarak 3 farklı standart sapma dikkate alınmıştır. Talep ortalamalarının %10’u düşük seviyeli standart sapma (σ_1), talep ortalamasının %15’i ise orta seviyeli standart sapma (σ_2), yüksek seviyeli standart sapmada ise talep ortalamalarının %20’si standart sapma (σ_3) olarak belirlenmiştir. Problemden ayrıca müşteri taleplerinin hangi güvenilirlik düzeyinde karşılanacağını da belirlenmesi

gerekmektedir. Müşteri taleplerinin yüksek güvenilirlik düzeyi ile karşılanması amaçlandığında test problemlerinde güvenilirlik düzeyi öncelikle %97,5 alınmıştır. Ancak literatürdeki çalışmalarda farklı güvenilirlik düzeyleriyle test problemlerinin oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden de bu çalışmada güvenilirlik düzeyinin model üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için %95 ve %90 güvenilirlik düzeyleri de kullanılarak test problemleri oluşturulmuştur. [16]. Literatürde yapılan çalışmalarda, test problemlerinin araç kapasitelerinin belirlenmesinde, talep toplamının yarısının alındığı tespit edilmiştir [1,48]. Bu yüzden bu çalışmada da, araç kapasitesinin belirlenmesinde toplama taleplerinin toplamının yarısı araç kapasitesi olarak alınmıştır.

4.3.1. Doğrusallaştırılmış STT_ÇD_ETDARP modeli ile ÇD_ETD_ARP'nin deterministik modelinin karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde, STT_ÇD_ETDARP'nin CCP modelinin doğru çalışıp çalışmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu tespitin yapılabilmesi için geliştirilen CCP modeli, deterministik matematiksel model ile karşılaştırılmıştır. İki modelin karşılaştırılması için önce 20 müşterinin yer aldığı deterministik problem, önceki bölümde ÇD_ETD_ARP için önerilen deterministik model üzerinde GAMS programında CPLEX Solver kullanılarak çözülmüştür. Stokastik problemi deterministik hale dönüştürmek için ise ortalama talepler aynı şekilde alınmış ancak taleplerin standart sapmasının 0 olduğu kabul edilmiştir. Deterministik modelde müşteri talepleri %100 olarak karşılandığında, stokastik modeli deterministik hale dönüştürürken de müşteri taleplerinin %100 karşılandığı varsayılmıştır. Bu yüzden de modelde Z değeri tabloda 0,9998 değerine karşılık gelen 3,49 değeri olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda her iki modelin çözümünde de aynı amaç fonksiyonuna ulaşılmış ve rotalar aynı şekilde oluşturulmuştur.

20 müşterinin yer aldığı Christofides ve Elion'un E-n51-k5 test problemi kullanılarak stokastik model ile deterministik modelin karşılaştırması yapılmıştır. Burada uzaklık matrisi problem verilerine göre alınmış, dağıtım talepleri deterministik probleme Salhi ve Nagy'nin dağıtım ve toplama taleplerini belirlemek için kullandıkları yöntemden faydalanılarak belirlenmiştir. Toplama talepleri, deterministik problemdeki toplama taleplerinin bulunduğu aralıkta olduğu varsayılarak, bu aralıkta rassal sayılar oluşturularak elde edilmiştir. Problemde araç kapasitesi her iki modelin çözümünde de 150 olarak

alınmıştır. Ayrıca depo sayısı da 2 olarak belirlenmiştir. GAMS programında çözölen örneklek Ek 4'te verilmiştir. GAMS programında CPLEX Solver'ı kullanarak modeller çözüldüğünde, stokastik modelin 33 saniyede çözüldüğü, deterministik modelin ise 34 saniyede çözüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca her iki modelin amaç fonksiyonu değeri de 282 olarak hesaplanmıştır. Her iki problemde de depodan çıkan araç sayısı 2 olarak bulunmuştur. Her iki modelin çözümünde de araçların rotaların aynı şekilde oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bu durum da oluşturulan şans kısıtlı programlama modelinin doğru bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir.

4.3.2. Farklı boyuttaki test problemleri ile modelin etkinliğinin analizi

Toplama taleplerinin stokastik olduğu çok depolu eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi için geliştirilen matematiksel model, doğrusal yaklaşım metodu ile doğrusal hale dönüştürölmüştür. Doğrusallaştırılmış model Intel Core i5-8265U CPU @1.60 GHz hızında işlemciye, 8 GB ara belleğe sahip, "Windows Home Single Language" özelliklerine sahip bilgisayarda GAMS 24.1.3 programına kodlanarak CPLEX 12.5.1.0 çözücüsü kullanılarak farklı boyuttaki problemler çözülmüştür.

Doğrusal hale getirilen modelin etkinliğinin belirlenmesi için ise Eniyi Çözüme Ulaşılan Problem Sayısı (EÇUPS), Ortalama Çözüm Süresi (OÇS) ve Yüzde Sapma Değeri (YSD) performans kriterlerinden faydalanılmıştır.

Test problemlerinin oluşturulmasında, Christofides ve Eilon ile Augerat ve arkadaşlarının önerdiği test problemleri kullanılmıştır [246,247]. Bu problemlerin ETD_ARP'ye uygun hale dönüştürölmesi için Salhi ve Nagy tarafından önerilen formölasyondan faydalanılmış ve böylece müşterilerin dağıtım talepleri belirlenmiştir [196]. Test problemlerinin oluşturulmasında standart sapma değeri 0,1 alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Günümüzde firmaların birbirleriyle rekabet edebilmeleri için müşteri beklentilerini en iyi ölçüde karşılamaları gerekmektedir. Bu durum da müşteri taleplerine hızlı bir şekilde cevap verilebilmesi ve değişken taleplerde bile müşteri taleplerinin yüksek oranda karşılanması ile mümkün olmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada, literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi, yüksek güvenilirlik düzeyinde müşterilerin taleplerinin karşılanacağı kabul edilerek, %97,5 güvenilirlik düzeyinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu

doğrultuda, güvenilirlik düzeyi %97,5 kabul edilerek model farklı test problemleri kullanılarak çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar ile Çizelge 4.1 oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin etkinliğini analiz etmek için, %97,5 güvenilirlik düzeyinde 10 ile 50 müşteri arasında 5 birim değiştirilerek, her birinden 5 farklı örnek alınarak oluşturulmuştur. Çizelgede ilk üç sütun sırasıyla, müşteri sayısını test probleminin güvenilirlik düzeyi ile çözülen problem sayısını göstermektedir. Çizelgede dördüncü sütun her bir müşteri grubunda çözülen 5 problem içerisinde En İyi Çözüme Ulaşılan Problem Sayısını, 5 problemin çözüm sürelerinin ortalamasını dikkate alan ortalama çözüm süresini ve ortalama yüzde sapma değerini göstermektedir.

Çizelge 4.1. Modelin %97,5 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Problem Sayısı</i>	<i>EÇUPS</i>	<i>OÇS</i>	<i>YSD</i>
10	97,5%	5	5	1,08	0,00
15	97,5%	5	5	42,57	0,00
20	97,5%	5	5	381,22	0,00
25	97,5%	5	5	302,96	0,00
30	97,5%	5	5	1433,56	0,00
35	97,5%	5	4	1438,04	1,26
40	97,5%	5	3	2918,75	1,78
45	97,5%	5	1	5175,50	4,11
50	97,5%	5	1	4062,04	4,21

Çizelge incelendiğinde müşteri sayısı arttıkça EÇUPS'nın azaldığı görülmektedir. %97,5 güvenilirlik altında çözülen problemler incelendiğinde, problemlerin ortalama çözüm sürelerinin 1,08 ile 5175,50 s arasında değiştiği görülmektedir. Beklenildiği gibi müşteri sayısı arttıkça ortalama çözüm süresi artmaktadır. ARP operasyonel bir karar olduğundan, makul sürede çözümün elde edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden problemlerin çözüm süreleri için 7200,00 s üst sınır olarak belirlenmiştir. Ancak büyük boyutlu problemlerde programda kapasite hatasıyla karşılaşıldığından dolayı, program 7200,00 s'den önce sonlanmıştır. Bu durumda çözüm süresi, kapasite hatasıyla karşılaştığı an olarak alınmıştır. Özellikle müşteri sayısı arttıkça kapasite hatasıyla karşılaşma durumu söz konusu olduğundan, 50 müşterili problemlerin OÇS değeri, 45 müşterili problemlerin OÇS değerine göre daha düşük çıkmıştır. Çizelge incelendiğinde, YSD'nin ise 30 müşteriye kadar %0 olduğu, müşteri sayısı arttıkça da YSD değerinin arttığı dikkat çekmektedir.

%97,5 güvenilirlik altında 35–50 arasında müşterinin yer aldığı test problemleri çözüldüğünde, YSD'nin 1,26 - 4,21 aralığı içerisinde değiştiği görülmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların güvenilirlik değişiminin model üzerindeki etkisinin belirlenmesi için farklı güvenilirlik düzeylerini kullanarak problemlerin çözüldüğü tespit edilmiştir [18,237]. Güvenilirlik düzeyinin %95 olarak alınmasıyla elde edilen sonuçlar kullanılarak Çizelge 4.2 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2. Modelin %95 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Problem Sayısı</i>	<i>EÇUPS</i>	<i>OÇS</i>	<i>YSD</i>
10	95%	5	5	1,06	0,00
15	95%	5	5	30,43	0,00
20	95%	5	5	209,54	0,00
25	95%	5	5	290,73	0,00
30	95%	5	5	821,62	0,00
35	95%	5	4	993,64	1,18
40	95%	5	3	2471,08	1,61
45	95%	5	2	2796,70	4,74
50	95%	5	1	3017,90	4,17

Çizelge 4.2 incelendiğinde 10-30 arasında müşterinin yer aldığı problemlerin tümünde eniyi çözümün elde edildiği dikkat çekmektedir. Problemlerin ortalama çözüm süreleri 1,06 ile 3052,39 s aralığında değişmektedir. Müşteri sayısı arttıkça genel olarak OÇS'nin ve YSD'nin arttığı dikkat çekmektedir. Ancak müşteri sayısı arttıkça programda kapasite hatası ile karşılaşıldığında, 7200,00 saniyeden önce program sonlanmış ve bu değer problemin çözüm süresi olarak alınmıştır. Özellikle 45 ve 50 müşterinin yer aldığı problemlerde kapasite hatası ile karşılaşmıştır. Çizelge incelendiğinde YSD'nin ise %0,64 ile % 4,17 aralığında değiştiği görülmektedir.

Güvenilirlik düzeyi %90 alındığında test problemlerinden elde edilen sonuçlar ile Çizelge 4.3 oluşturulmuştur. Çizelge 4.3 incelendiğinde 35 müşteriye kadar tüm test problemlerinde en iyi sonucun elde edildiği görülmektedir. Test problemlerinin OÇS ise 0,78 – 3834,36 saniye arasında değişmektedir. Beklenildiği gibi problemin büyüklüğü arttıkça, çözüm süresi de artmaktadır. Bu güvenilirlik düzeyi kullanılarak çözülen 50

müşterili test problemlerinde kapasite hatası ile karşılaşmıştır. YSD'nin ise 35 müşteriden sonra %0,23 ile %4,01 aralığında olduğu dikkat çekmektedir. Çizelge incelendiğinde, müşteri sayısı arttıkça YSD'nin de arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Modelin %90 güvenilirlik ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Problem Sayısı</i>	<i>EÇUPS</i>	<i>OÇS</i>	<i>YSD</i>
10	90%	5	5	0,78	0,00
15	90%	5	5	22,19	0,00
20	90%	5	5	205,04	0,00
25	90%	5	5	238,23	0,00
30	90%	5	5	420,58	0,00
35	90%	5	4	1220,79	1,47
40	90%	5	4	2414,73	0,84
45	90%	5	2	2223,05	3,88
50	90%	5	1	3700,29	2,42

Bu bölümde modelin etkinliğini analiz edebilmek için her bir güvenilirlik düzeyinde 45 adet, toplamda farklı boyutlarda 135 adet test problemi çözülmüştür. Güvenilirlik düzeyinin model üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'ün birlikte incelenmesi gerekmektedir. % 97,5 güvenilirlik düzeyinde çözülen 45 adet test probleminden 34 tanesinde eniyi çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. % 95 güvenilirlik düzeyinde çözülen 45 adet test probleminden 34 adedinde eniyi çözüm elde edilebilmişken, % 90 güvenilirlik düzeyinde çözülen 45 problemin 36 tanesinde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Bu durum da güvenilirlik düzeyi azaldıkça genel olarak eniyi çözüme ulaşılan problem sayısının arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, OÇS'nin de güvenilirlik düzeyi düştükçe genelde azaldığı, ancak büyük boyutlu problemlerde kapasite hatası ile karşılaşıldığından dolayı bu azalmanın net olarak görülemediği tespit edilmiştir. Her üç çizelgeden de 10 – 40 arasında müşterinin yer aldığı problemler incelendiğinde ise, güvenilirlik düzeyi düştükçe OÇS'nin de düştüğü çıkarımı yapılabilir. Her 3 çizelgeden de YSD ile ilgili sütunu incelediğimizde ise müşteri sayısı arttıkça YSD'nin arttığı, aynı müşteri sayısının dikkate alındığı durumda güvenilirlik düzeyi düştükçe ise YSD'nin de düştüğü tespit edilmiştir. Modelin etkinliğini analiz etmek için çözülen 135 problemin 105 tanesinde belirlenen süre içerisinde en iyi çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Beklenildiği gibi, müşteri sayısı arttıkça, en iyi çözüme ulaşan problem sayısında düşüş yaşandığı

görülmüştür. Problemlerdeki müşteri sayısı arttıkça genellikle ortalama çözüm süresi de artmaktadır. Bunun yanında, problem boyutu arttığında, bir kısım problemde, 7200,00 saniye içerisinde en uygun çözüme ulaşılamadığı görülmüştür. Yine beklenildiği gibi müşteri sayısı arttıkça, eniyi çözümden sapmayı gösteren YSD'nin de yükseldiği dikkat çekmektedir. Ayrıca buradan, müşteri sayısı arttıkça makul sürede en iyi çözüme ulaşılamayacağı da tespit edilmiştir. Çözülen test problemlerinden 27 tanesine kapasite hatasıyla karşılaşılmaması nedeniyle eniyi çözüme ulaşılamadığı, yalnızca 3 tanesinde 7200,00 saniye içerisinde zaman kısıtlaması nedeniyle eniyi çözüme ulaşılamadığı tespit edilmiş olup, bu problemler 7200,00 s'lik zaman kısıtlaması kaldırılarak yeniden çözülmüştür. Bu problemlerin yeniden çözülmesiyle beklenildiği gibi ortalama çözüm sürelerinde artış olduğu tespit edilmiş, diğer taraftan bu problemlerin çözüm sonuçlarında eniyi sonuca ulaşıldığı belirlenmiştir. 135 test probleminde eniyi çözüme ulaşılamayan kalan problemler incelendiği

4.3.3. Doğrusallaştırılan modelde değişkenlerin etkisinin analizi

Bu bölümde 20 müşterinin yer aldığı problemde, araç kapasitesinin, standart sapmanın ve güvenilirlik düzeyinin değiştirilmesinin etkileri, geliştirilen matematiksel model üzerinde test edilmiştir. Araç kapasitesinin etkinliğinin test edilebilmesi için araç kapasitesi, dağıtım talebinin yarısı, toplama talebinin yarısı ve bu iki değerin arasında yer alan bir değer dikkate alınarak, 100, 125 ve 150 alınarak hesaplama yapılmıştır. Standart sapma değişiminin etkisinin incelenmesi için, standart sapmanın toplama taleplerinin düşük (0,1), orta (0,15) ve yüksek (0,2) olduğu kabul edilerek farklı problemler üretilerek hesaplama yapılmıştır. Bunların yanında güvenilirlik düzeyinin değiştirilmesinin de etkisi incelenmeye çalışılmış, model üzerinde %90, %95 ve %97,5 olarak alınmış ve bu değerler için farklı problemler oluşturularak hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan değişiklikler ile aynı dağıtım ve toplama talepleri kullanılarak, kapasite, güvenilirlik düzeyi ve standart sapma değerleri değiştirilerek 27 farklı test problemi üretilmiş ve bu test problemlerinde bu değişkenlerin değerlerinin değiştirilmesinin etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 standart sapmanın değerinin değiştirilmesinin analizi için oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. $\sigma = 0,10$ olduğunda elde edilen sonuçlar

Müşteri Sayısı	Depo Sayısı	Araç Sayısı	Araç Kapasitesi	Standart Sapma	Güvenilirlik Düzeyi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
20	2	4	100	0,1	97,50%	316	817,31
20	2	4	100	0,1	95%	316	751,44
20	2	3	100	0,1	90%	319	4913,11
20	2	4	125	0,1	97,50%	300	971,02
20	2	4	125	0,1	95%	299	927,31
20	2	3	125	0,1	90%	298	1106,19
20	2	4	150	0,1	97,50%	292	35,83
20	2	3	150	0,1	95%	290	174,61
20	2	3	150	0,1	90%	282	349,42

Çizelge 4.5. $\sigma = 0,15$ olduğunda elde edilen sonuçlar

Müşteri Sayısı	Depo Sayısı	Araç Sayısı	Araç Kapasitesi	Standart Sapma	Güvenilirlik Düzeyi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
20	2	5	100	0,15	97,50%	329	5494,97
20	2	5	100	0,15	95%	316	1257,17
20	2	4	100	0,15	90%	316	1510,88
20	2	4	125	0,15	97,50%	315	2061,19
20	2	4	125	0,15	95%	313	2543,61
20	2	3	125	0,15	90%	300	256,89
20	2	4	150	0,15	97,50%	297	87,19
20	2	4	150	0,15	95%	287	84,02
20	2	3	150	0,15	90%	286	72,17

Çizelge 4.6. $\sigma = 0,20$ olduğunda elde edilen sonuçlar

Müşteri Sayısı	Depo Sayısı	Araç Sayısı	Araç Kapasitesi	Standart Sapma	Güvenilirlik Düzeyi	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
20	2	5	100	0,2	97,50%	333	3267,64
20	2	5	100	0,2	95%	331	4072,84
20	2	4	100	0,2	90%	329	3462,72
20	2	4	125	0,2	97,50%	316	1518,81
20	2	4	125	0,2	95%	315	3963,63
20	2	3	125	0,2	90%	309	1328,56
20	2	4	150	0,2	97,50%	297	386,55
20	2	4	150	0,2	95%	296	337,36
20	2	3	150	0,2	90%	288	161,31

Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 incelendiğinde, standart sapma değeri arttıkça amaç fonksiyonu değerinin yani maliyetin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca standart sapmanın artmasıyla beraber, bazı problemlerde araç sayısının arttığı da dikkat çekmektedir. Araç sayısının artması da bir maliyet kalemi oluşturacağından dolayı, araç sayısının artışı da toplam maliyeti artıracaktır. Aslında problemde amaç az araçla minimum mesafenin kat edilmesidir. Bu yüzden öncelikle amaç fonksiyonuna araç sayısı da bir maliyet kalemi olarak eklenmiş, ancak amaç fonksiyonuna bu değişkenin eklenmesi araç sayısında değişikliğe neden olmamış olup sadece çözüm süresini uzattığından dolayı amaç fonksiyonundan bu değişken çıkarılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan test problemlerinin çözülmesiyle, standart sapma değeri arttıkça toplam maliyetin arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. Güvenilirlik düzeyi %97,5 olduğunda elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Depo Sayısı</i>	<i>Araç Sayısı</i>	<i>Araç Kapasitesi</i>	<i>Standart Sapma</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Amaç Fonksiyonu</i>	<i>Çözüm Süresi</i>
20	2	4	100	0,1	97,50%	316	817,31
20	2	5	100	0,15	97,50%	329	5494,97
20	2	5	100	0,2	97,50%	333	3267,64
20	2	4	125	0,1	97,50%	300	309,47
20	2	4	125	0,15	97,50%	315	2061,19
20	2	4	125	0,2	97,50%	316	1518,81
20	2	4	150	0,1	97,50%	292	35,83
20	2	4	150	0,15	97,50%	297	87,19
20	2	4	150	0,2	97,50%	297	386,55

Çizelge 4.8. Güvenilirlik düzeyi %95 olduğunda elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Depo Sayısı</i>	<i>Araç Sayısı</i>	<i>Araç Kapasitesi</i>	<i>Standart Sapma</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Amaç Fonksiyonu</i>	<i>Çözüm Süresi</i>
20	2	4	100	0,1	95%	316	751,44
20	2	5	100	0,15	95%	316	1257,17
20	2	5	100	0,2	95%	331	4072,84
20	2	3	125	0,1	95%	297	186,95
20	2	4	125	0,15	95%	313	2543,61
20	2	4	125	0,2	95%	315	3963,63
20	2	3	150	0,1	95%	290	174,61
20	2	4	150	0,15	95%	287	84,02
20	2	4	150	0,2	95%	296	337,36

Çizelge 4.9. Güvenilirlik düzeyi %90 olduğunda elde edilen sonuçlar

<i>Müşteri Sayısı</i>	<i>Depo Sayısı</i>	<i>Araç Sayısı</i>	<i>Araç Kapasitesi</i>	<i>Standart Sapma</i>	<i>Güvenilirlik Düzeyi</i>	<i>Amaç Fonksiyonu</i>	<i>Çözüm Süresi</i>
20	2	3	100	0,1	90%	319	4913,11
20	2	4	100	0,15	90%	316	1510,88
20	2	4	100	0,2	90%	329	3462,72
20	2	3	125	0,1	90%	298	384,91
20	2	3	125	0,15	90%	300	256,89
20	2	3	125	0,2	90%	309	1328,56
20	2	3	150	0,1	90%	282	349,42
20	2	3	150	0,15	90%	286	72,17
20	2	3	150	0,2	90%	288	161,31

Güvenilirlik düzeyinin değiştirilmesinin etkisinin belirlenebilmesi için Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9 oluşturulmuştur. Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9 incelendiğinde, güvenilirlik düzeyi yükseldikçe amaç fonksiyonu değerinin arttığı veya araç sayısında artışın olduğu dikkat çekmektedir. Güvenilirlik düzeyi arttıkça, modelde yer alan Z tablosundan elde ettiğimiz kat sayı yükseldiği için, toplam maliyetin de yükselmesi beklenmektedir ve test problemlerinin çözülmesiyle elde edilen sonuçlarda da, güvenilirlik düzeyi arttıkça, toplam maliyette de artışın meydana geldiğini göstermiştir.

Aracın kapasitesi artırıldığında, ortalama yapacak araç sayısının düşmesi beklenmektedir. Ayrıca rotaya başlayan araca daha fazla ürün yüklemesi yapılabileceğinden, aynı araç ile daha fazla müşteriye hizmet verilebilecektir. Bu durum da toplam kat edilen mesafenin düşmesini sağlayacaktır. Araç kapasitesi arttıkça amaç fonksiyonunun düştüğü, ayrıca bazı problemlerde araç kapasitesinin artırılmasıyla rotaya çıkan araç sayısının da azaldığı tespit edilmiştir. Müşterilere hizmet veren araçların kapasitesinin artırılması hem araç maliyetini hem de aracın yakıt tüketimini arttıracığından taşıma maliyetini arttıracaktır. Ayrıca araç kapasitesinin artırılması da atıl kapasiteye neden olacağından dolayı bir maliyet kalemi oluşturacaktır. Ancak bu durum amaç fonksiyonunda tanımlanmadığından ne kadar maliyete katlanacağı mevcut durumda bilinmemektedir.

Araç kapasitesini artırıldığında problemin çözüm zamanının da düşmesi beklenmektedir. Ancak kapasitenin artırılmasının ile çözülen 18 problemin 17 adedinin çözümünde çözüm süresinin düştüğü, yani yaklaşık %94,4 oranında, 1 adet problemde ise çözüm süresinde artış olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

ARP, uzun yıllardan beri araştırmacılar tarafından çalışılmakta olan bir konu olup, hala da geliştirilmeye müsait bir araştırma konusudur. Diğer taraftan, gerçek hayat problemlerinde, planlama esnasında değişiklikler gerekebilmektedir. Örneğin müşteri talepleri önceden kesin olarak bilinmeyip, araç müşterinin bulunduğu lokasyona ulaştığında müşteri talebi öğrenilebilir, ayrıca araç müşterinin bir yandan dağıtım taleplerini karşılarken, diğer taraftan tamir, bakım, geri dönüşüm vb. hizmetleri gerçekleştirmek için müşterinin toplama taleplerini de aynı araç ile gerçekleştirebilir. Benzer şekilde, gerçek hayat problemleri ele alındığında da, firmaların, müşterilerin taleplerini karşılamak için birden çok depoya sahip olduğu durumlarla da sıkça karşılaşıldığı görülmektedir.

Günümüzde rekabet şartlarının artmasıyla beraber firmaların, müşterilerine daha hızlı bir şekilde ulaşabilmek, daha iyi şartlarda hizmet sağlayabilmek için tedarik ve lojistik yönetimine verdiği önemin arttığı görülmektedir. Artan rekabet şartları altında maliyetlerini düşürmek isteyen firmalar, taşıma maliyetlerini minimuma indirmeye çalışmaktadır. Özellikle müşterilerden gelen toplama taleplerinin dolaşımda olan araçlar tarafından karşılanması firmalara maliyet, zaman ve müşteri memnuniyeti açısından büyük avantajlar sağlayacaktır. Firmalar farklı lokasyonlarda yer alan müşterilerinin taleplerini karşılamak için, müşterilerine hizmet verecek araçların uygun rotalarını belirleyerek taşıma maliyetlerini minimuma çekmeyi amaçlamaktadır. Ancak gerçek hayat problemlerinde, tüm parametrelerin deterministik olmadığı, yani zaman içerisinde değişkenlik gösterdiği görülmektedir. SARP, problemdeki bir veya daha fazla parametrenin stokastik olduğu araç rotalama problemidir. Literatürdeki SARP konusundaki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların daha çok STARP üzerinde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. STARP, müşteri taleplerinin, araç müşterinin bulunduğu noktaya gidene kadar kesin olarak bilinmediği, ancak araç müşteri lokasyonuna vardığında talebin tam olarak öğrenildiği problemidir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi (STARP), Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇDARP) ve Eş Zamanlı Araç Rotalama Problemi (ETD_ ARP) çeşitlerinin üzerinde ayrı ayrı olarak birçok çalışma yapıldığı ve bu problemlerin çözümü için birçok sezgisel ve meta-sezgisel algoritma önerildiği

görülmüştür. Ancak yapılan literatür araştırmasında bu üç ARP'nin birleşimi olan Stokastik Talepli Çok Depolu Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin (STT_ÇD_ETDARP) daha önce incelenmediği tespit edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada, STT_ÇD_ETDARP incelenmiştir.

Çalışmada ilk olarak ÇD_ETD_ARP için bir matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Bu matematiksel model geliştirilirken tek deponun yer aldığı ETD_ARP için literatürde yer alan matematiksel modeller incelenmiş olup, ÇD_ETD_ARP için bir matematiksel model geliştirilmiştir [10,194,197,204]. Geliştirilen matematiksel modelin etkinliğinin analiz edilmesi için, tek depolu ve çok depolu özellikte, 10 ile 50 arasında müşterinin yer aldığı, farklı kapasitedeki araçların kullanıldığı (düşük, orta, yüksek) 810 adet test problemi çözülmüştür. Bu problemlerin çözümünde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çok depolu örnekler sonucunda elde edilen sonuçların, tek depolu örneklerin çözümünde elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çok depolu problemlerin daha kısa sürede en iyi çözüme ulaştığı görülmüştür. Araç kapasitesinin artırılmasının ise hem çözüm zamanı üzerinde hem de amaç fonksiyonu değeri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, aynı araç ile müşterilerin hem dağıtım hem de toplama taleplerinin karşılandığı, müşterilerin dağıtım taleplerinin önceden bilindiği, ancak toplama taleplerinin ancak araç müşteri lokasyonuna ulaştığında öğrenildiği ve müşterilere birden fazla depodan hizmet verilen STT_ÇD_ETDARP ele alınmıştır. Stokastik talebin dikkate alındığı matematiksel modelin geliştirilmesinde şans kısıtlı programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Literatürde STARP'nin incelendiği çalışmalara bakıldığında, modelin oluşturulmasında şans kısıtlı programlama yaklaşımından faydalanan çalışmalarda, müşteri taleplerinin normal dağılımı sağladığını varsaydıkları tespit edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada da, stokastik toplama taleplerinin normal dağılımı sağladığı varsayılmıştır.

STT_ÇD_ETDARP için geliştirilen model stokastik bilgi içerdiğinden dolayı doğrusal olmayan bir yapı içermektedir. Modelin doğrusal özellikte olmaması da GAMS programının CPLEX çözücüsü ile çözülmesine engel olmaktadır. Geliştirilen matematiksel model doğrusal yaklaşım metodu ile doğrusal hale getirilmiştir.

Doğrusal hale dönüştürülmüş modelin etkinliğinin analiz edilmesi için 10 ile 50 müşteri arasında farklı güvenilirlik düzeyleri altında 135 adet test problemi oluşturulmuştur. %97,5 ve % 95 güvenilirlik düzeylerinde çözülen 45 adet test probleminden 34 adedinde eniyi çözüme ulaşılabilmişken, %90 güvenilirlik düzeyinde çözülen aynı özellikte 45 adet test probleminden 36 tanesinde en iyi çözüme ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu test problemlerinin çözülmesiyle elde edilen sonuçlara göre, güvenilirlik düzey arttıkça, yani aracın stokastik müşteri taleplerini karşılama olasılığı yükseldikçe, problemin ortalama çözüm süresinin arttığı ve amaç fonksiyonunun da kötüleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca müşteri sayısı arttıkça çözüm süresinin arttığı ve en iyi çözüme ulaşan problem sayısında da düşüş olduğu görülmektedir. Özellikle 40 ile 50 arasında müşterinin yer aldığı problemlerde belirlenen süre içerisinde en iyi çözüme ulaşamadığı tespit edilmiştir. Bu durum da büyük boyutlu problemler için makul sürede en iyi çözümün elde edilemeyeceğini göstermektedir.

Çalışmanın son bölümünde ise doğrusal yaklaşım metodu ile oluşturulan matematiksel modelin etkinliği analiz edilmiştir. Öncelikle 20 müşterili problemde, farklı standart sapma değerleri (0,1, 0,15 ve 0,20), farklı güvenilirlik düzeyleri (%97,5, %95 ve %90) ile farklı araç kapasiteleri dikkate alınarak test problemleri oluşturulmuş ve bu değişkenlerin matematiksel model üzerindeki etkisi analiz edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çözümler sonucunda, standart sapma değeri arttıkça genellikle amaç fonksiyonunun ve çözüm süresinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca güvenilirlik düzeyi arttıkça da problemlerin eniyi çözüme daha uzun sürede ulaştığı ve amaç fonksiyonu değerlerinin de kötüleştiği görülmüştür. Beklenildiği gibi, araç kapasitesi arttıkça da, amaç fonksiyonu değeri iyileşmekte ve en iyi çözüme ulaşma süresi de düşmektedir.

Bu çalışmada STT_ÇD_ETDARP incelenmiş, bu problem için matematiksel model önerisinde bulunulmuş, geliştirilen matematiksel model doğrusal hale getirilmiş ve modelin etkinliği analiz edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda müşterilerin toplama taleplerinin yanında dağıtım taleplerinin de stokastik olduğu ÇD_ETD_ARP incelenebilir. Ayrıca geliştirilen matematiksel modelin analizinde, 50 müşterinin yer aldığı problemlerin makul sürede eniyi çözüme ulaşamadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden, bundan sonraki çalışmalarda orta ve büyük boyuttaki problemlere makul sürede uygun çözüm bulabilecek sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler kullanılarak çözüm algoritmaları geliştirilebilir. Bu çalışmada araçların homojen olduğu, yani kapasite ve hızlarının birbirine eşit olduğu kabul

edilerek matematiksel model geliştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda heterojen araç filosunun da dikkate alındığı matematiksel model oluşturularak çözümü için sezgisel veya meta-sezgisel yöntemlerden faydalanılarak çözüm algoritmaları önerisinde bulunulabilir.



KAYNAKLAR

1. Uslu, A. (2016). *Afet Sonrası İnsani Yardım Lojistiğinde Stokastik Talepli Çok Depolu Araç Rotalama Problemi: Ankara İli Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
2. Dantzig, G.B. and Ramser, J.H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91.
3. Kızıloğlu, K. (2017). *Stokastik Talepli Çok Depolu Araç Rotalama Problemi İçin Sezgisel Bir Çözüm Yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
4. Aydoğdu, B. (2017), *Dinamik Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Matematiksel Model ve Sezgisel Yaklaşımlar*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Lin, S.W., Lee, Z.J., Ying, K.C. and Lee, C.Y. (2009). Applying hybrid meta-heuristic for capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1505-1512.
6. Toth, P. and Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 5-23.
7. Min, H. (1989). The Multiple Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup Points. *Transportation Research A*, 23 (5), 377-386.
8. Solomon, M.M. and Desrosiers, J. (1988). Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science*, 22(1) 1-13.
9. Hemmelmayr, V.C., Doerner, K. F. And Hartl R. F. (2007). A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 791-802.
10. Karaoğlu, İ. (2008). *Dağıtım Ağları Tasarımında Yer Seçimi ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemleri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
11. Desticioğlu, B. ve Özyörük, B. (2019, 2-3 Şubat), *Dinamik ARP, Çok Depolu ARP ve Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP için Literatür Taraması*. III. Uluslararası Matematik–Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi’nde sunuldu, Şanlıurfa.
12. Ritzinger, U., Punchinger, J. and Hartl, R.F. (2016). A Survey on Dynamic and Stochastic Vehicle Routing Problems. *International Journal of Production Research*, 54(1), 215-231.
13. Gültepe, A. (2011). *Stokastik Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Melez Yaklaşım: Diferansiyel Evrim Algoritması*, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

14. İşleyen, S.K. (2008). *Lojistik Yönetim Sistemlerinde Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
15. Oyola, J., Arntzen, H. and Woodruff, D.L. (2018) The Stochastic Vehicle Routing Problem a Literature Review, Part I: Models. *EURO Journal on Transportation Logistics*, 7, 193-221.
16. Charnes, A. and Cooper, W.W. (1962). Chance Constraints and Normal Derivates. *Journal of the American Statistical Association*, 57, 134-148.
17. Charnes, A. and Cooper, W.W. (1963). Deterministic Equivalents for Optimizing and Satisficing under Chance Constraints. *Operations Research*, 11(1), 18-39.
18. Ozcan, U. (2010). Balancing Stochastic Two-Sided Assembly Lines: A Chance-Constrained, Piecewise-Linear, Mixed Integer Program and Simulated Annealing Algorithm. *European Journal of Operational Research*, 205, 81-97.
19. Gendreau, M., Laporte, G. and Guo, B. (1996). Stochastic Vehicle Routing: Invited Review. *European Journal of Operational Research*, 88, 3-12.
20. Desticioğlu, B. ve Özyörük, B. (2019). Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi İçin Literatür Taraması. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 2, 181-222.
21. Bertsimas, D.J. (1992). A Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand. *Operations Research*, 40 (3) , 574–585.
22. Dror, M., Laporte, G. and Louveaux, F.V. (1993). Vehicle Routing with Stochastic Demands and Restricted Failures. *Zeitschrift für Operations Research Methods and Models of Operation Research*, 37(3), 273-283.
23. Dror, M., (1993). Modeling Vehicle Routing with Uncertain Demands as a Stochastic Program: Properties of the Corresponding Solution. *European Journal of Operational Research*, 64, 432–441.
24. Laporte, G., Louveaux, F.V. and Hamme, L.V. (2002). An Integer L-Shaped Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Operational Research*, 50(3), 415–423.
25. Goodson, J.C., Ohlmann, J.W. and Thomas, B.W. (2012). Cyclic-Order Neighborhoods with Application to the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand. *European Journal of Operational Research*, 217(2), 312–323.
26. Juan, A., Faulin, J., Grasman, S., Riera , D., Marull, J. and Mendez, C. (2011). Using Safety Stocks and Simulation to Solve The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand. *Transportation Research Part C:Emergency Technology*, 19(5), 751–765.
27. Zho, L., Rousseau, L-M., Rei, W. and Li, B. (2014). Paired Cooperative Reoptimization Strategy for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computers & Operations Research*, 50, 1–13.

28. Yang, W.H. (1996). *Stochastic Vehicle Routing with Optimal Restocking*, PhD thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, U.S.A..
29. Biesinger, B., Hu., B. and Raidl, G.R. (2016). An Integer L-Shaped Method for the Generalized Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 52, 245-252.
30. Jabali, O., Rei, W., Gendreau, M. and Laporte, G. (2014). Partial-Route Inequalities for the Multi-Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Discrete Applied Mathematics*, 177, 121-136.
31. Dror, M. (2016). Vehicle Routing with Stochastic Demands: Models & Computational Methods. *International Series in Operations Research and Management Science*, 46, 425-449.
32. Ak, A. and Erera, A.L. (2007). A Paired-Vehicle Recourse Strategy for the Vehicle-Routing Problem with Stochastic Demands. *Transportation Science*, 41, 222 –237.
33. Laporte, G. and Louveaux, F. (1990). Formulations and Bounds for Stochastic Vehicle Routing Problem with Uncertain Supplies in Economic. In J. J. Gabzewicz, J. F. Richard, and L. A. Wolsey (Eds.), *Decision-Making: Games, Econometrics, and Optimization*, North-Holland, Amsterdam, 220-242.
34. Yang, W., Mathur, K. and Ballou, R. H. (2000). Stochastic Vehicle Routing Problem with Restocking. *Transportation Science*, 34 (1), 99–112.
35. Gauvin, C., Desaulniers, G. and Gendreau, M. (2014). A Branch-Cut-and-Price Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computers & Operations Research*, 50, 141–153.
36. Louveaux, F.V. and Salazar-Gonzalez, J.J. (2018). Exact Approach for the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demands and Preventive Returns. *Transportation Science*, 52(6), 1297-1310.
37. Hernandez, F., Gendreau, M., Jabali, O. and Rei, W. (2019). A Local Branching Metaheuristic for the Multi-Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Journal of Heuristics*, 25(2), 215-245.
38. Ismail, Z. and Irhamah, I. (2008). Solving the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands via Hybrid Genetic Algorithm-Tabu Search. *Journal of Mathematics and Statistics*, 4(3), 161-167.
39. Biesinger, B., Hu., B. and Raidl, G.R. (2015). A Variable Neighborhood Search for the Generalized Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, 48-60.
40. Biesinger, B., Hu., B. and Raidl, G.R. (2018). A Genetic Algorithm in Combination with A Solution Archive for Solving the Generalized Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Transportation Science*, 52(3), 497-503.

41. Marinakis, Y., Iordanidou, G.R. and Marinaki, M. (2013). Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Applied Soft Computing*, 13(4), 1693-1704.
42. Pasha, U., Hoff, A. and Hvattum, L.M. (2017). The Multi-Period Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computational Methods and Models for Transport*, 121-146.
43. Teodorovi'c, D. and Pavkovi'c, G. (1992). A Simulated Annealing Technique Approach to the Vehicle Routing Problem in the Case of Stochastic Demand. *Transportation Planning and Technology*, 16, 261–273.
44. Haugland, D., Ho, S.C. and Laporte, G. (2007). Designing Delivery Districts for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, 180(3), 997–1010.
45. Wang, K., Lan, S. and Zhao, Y. (2017). A Genetic-Algorithm-Based Approach to the Two Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands in Logistics Service. *Journal of the Operational Research Society*, 68(11), 1409-1421.
46. Salavati-Khosghalb, M., Gendreau, M., Jabali, O., and Rei, W. (2019a). A Rule-Based Recourse for the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demands. *Transportation Science*, 53(5), 1213-1499.
47. Salavati-Khosghalb, M., Gendreau, M., Jabali, O. and Rei, W. (2019b). An Exact Algorithm to Solve the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demands under an Optimal Restocking Policy. *European Journal of Operational Research*, 273(1), 175-189.
48. Salavati-Khosghalb, M., Gendreau, M., Jabali, O. and Rei, W. (2019c). A Hybrid Recourse Policy for the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demands. *Euro Journal on Transportation and Logistics*, 8(3), 269-298.
49. Mendoza, J.E., Castanier, B., Gue'ret, C., Medaglia, A.L. and Velasco, N. (2010). A Memetic Algorithm for the Multi Compartment Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computers & Operations Research*, 37(11), 1886–1898.
50. Baykoç, Ö.F. ve İşleyen, S. K. (2007). Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi İçin Şans Kısıtı Yaklaşımı. *Teknoloji*, 10(1), 31-39.
51. Dinh, T., Fukasawa, R. and Luadtka, J. (2018). Exact Algorithms for the Chance-Constrained Vehicle Routing Problem. *Mathematical Programming*, 172(1-2), 105-138.
52. Dror, M. and Trudeau, P. (1986). Stochastic Vehicle Routing with Modified Savings Algorithm. *European Journal of Operational Research*, 23, 228-235.
53. Stewart, W.R. and Golden, B.L. (1983). Stochastic Vehicle Routing: A Comprehensive Approach. *European Journal Of Operational Research*, 14, 371-385.

54. Laporte, G., Louveaux, F. and Mercure, H. (1989). Models and Exact Solutions for a Class of Stochastic Location-Routing Problems. *European Journal of Operational Research*, 39(1), 71-78.
55. Dror, M., Laporte, G. and Louveaux, F.V. (1993). Vehicle Routing with Stochastic Demands and Restricted Failures. *Zeitschrift für Operations Research Methods and Models of Operation Research*, 37(3), 273-283.
56. Bastian, C. and Kan, R. (1992). The Stochastic Vehicle Routing Problem Revisited. *European Journal of Operational Research*, 56, 407-412.
57. Bertsimas, D. J., Chervi, P. and Peterson, M. (1995). Computational Approaches to Stochastic Vehicle Routing Problems. *Transportation Science*, 29 (4), 342–352.
58. Tang, S., Ong, H.L. and Huang, H.C. (2003). A Comparative Study of Metaheuristics for Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 20, 103-119.
59. Bianchi, L., Birattari, M., Manfrin, M., Mastrolilli, M., Paquete, L., Rossi-Doria, O. and Schiavinotto, T. (2004, 18-22 September). *Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands*. Paper presented at the in International conference on parallel problem solving from nature VIII, Berlin.
60. Moghaddam, B.F., Ruiz, R. and Sadjadi, S.J. (2012). Vehicle Routing Problem with Uncertain Demands: An Advanced Particle Swarm Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 306-317.
61. Mendoza, J.E. and Villegas, J.G. (2013). A Multi-Space Sampling Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Optimization Letters*, 7(7), 1503–1516.
62. Juan, A., Faulin, J., Jorba, J., Cacaes, J. and Marques, J.M. (2013). Using Parallel & Distributed Computing Solving Real Time Vehicle Routing Problems with Stochastic Demands. *Annals of Operations Research*, 207(1), 43-65.
63. Marinakis, Y., Marinaki, M. and Spanou, P. (2015). A Memetic Differential Evolution Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Adaptation and Hybridization in Computational Intelligence*, 18, 185-204.
64. Calvet, L., Beraus, A.P., Travessat-Baro, O. and Juan, A.A. (2016). A Simheuristic for the Heterogeneous Site-Dependent Asymmetric VRP with Stochastic Demands. *Advances in Artificial Intelligence*, 12, 408-417.
65. Saransola, B., Doerner, K.F., Schmid, V. and Alba, E. (2016). Variable Neighborhood Search for the Stochastic and Dynamic Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 236(2), 425-461.
66. Marinaki, M. and Marinakis, Y. (2016). A Glowworm Swarm Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Expert Systems with Applications*, 46, 145-163.

67. Liu, C., Kou, G. and Huang, F. (2016). Vehicle Coordinated Strategy for Vehicle Routing Problem with Fuzzy Demands. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1-10.
68. Luo, Z., Qin, H., Zhang, D. and Lim, A. (2016). New Exact Algorithm and Solution Properties for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Weight-Related Cost. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 85, 69-89.
69. Subramanyam, A., Repoussis, P.P., and Gounaris, C.E. (2020). Robust Optimization of A Broad Class of Heterogeneous Vehicle Routing Problems Under Demand Uncertainty. *Inform's Journal on Computing*, 32(3), 661-681.
70. Florio, A., Hartl, R., Minner, S. (2020). New Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Transportation Science*, 54(4), 1073-1090.
71. Gutierrez, A. Dieulle, L., Labadie, N. and Velasco, N. (2018). A Hybrid Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demands. *Computers & Operations Research*, 99, 135-147.
72. Festa, P., Pastore, T., Ferore, D., Juan, A.A. and Bayliss, C. (2018, 9-12 December). *Integrating Biased-Randomized GRASP with Monte Carlo Simulation for Solving the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands*. Paper presented at the Winter Simulation Conference, Gothenburg.
73. Arvianto, A., Saptadi, S. Budiawan, W. and Nartadhi, R.L. (2019). Vehicle Routing Problem Model and Simulation with Probabilistic Demand and Sequential Insertion. *AIP Conference Proceedings*, Malang City, Indonesia, 1-10.
74. Erera, A.L., Morales, J.C. and Savelsbergh, M. (2010). The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints. *Transportation Science*, 44(4), 474-492.
75. Mendoza, J.E., Rousseau, L.M. and Villegas, J.G. (2016). A Hybrid Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints. *Journal of Heuristics*, 22(4), 539-566.
76. Goodson, J.C., Thomas, B.W. and Ohlmann, J.W. (2015). Restocking-Based Rollout Policies for the Vehicle Routing Problem with Stockhastic Demand and Duration Limits. *Transportation Science*, 50(2), 363-370.
77. Mendoza, J.E., Rousseau, L.M. and Villegas, J.G. (2016). A Hybrid Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints. *Journal of Heuristics*, 22(4), 539-566.
78. Goodson, J.C. (2015). A Priori Policy Evaluation and Cyclic-Order-Based Simulated Annealing for the Multicompartment Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 361-369.

79. Ulmer, M.W., Mattfeld, D.C., Hennig, M. and Goodson, J.C. (2015). A Rollout Algorithm For Vehicle Routing with Stockhastic Customer Requests. *Logistic Management*, 217-227.
80. Sungur, I, Ordoñez, F. and Dessouky, M. (2008). A Robust Optimization Approach for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Demand Uncertainty. *IIES Transactions*, 40, 509–523.
81. Gounaris, C.E., Wiesemann, W. and Floudas, C.A. (2013). The Robust Capacitated Vehicle Routing Problem Under Demand Uncertainty. *Operations Research*, 61(3), 677–693.
82. Gendreau, M., Laporte, G. and Seguin, R. (1995). An Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers. *Transportation Science*, 29(2), 143-155.
83. Tan, K.C., Cheong, C.Y. and Goh, C.K. (2007). Solving Multiobjective Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand via Evolutionary Computation. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 813-839.
84. Jaillet, P. and Odoni, A. (1988). The Probabilistic Vehicle Routing Problem In B. L. Golden and A. A. Assad (Eds.), *Vehicle Routing: Methods and Studies*, North-Holland, Amsterdam, 110-119.
85. Hjorring, C. and Holt, J. (1999). New Optimality Cuts for a Single-Vehicle Stochastic Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 86, 569–584.
86. Secomandi, N. (2000). Comparing Neuro-Dynamic Programming Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computers and Operations Research*, 27 (5), 1171–1200.
87. Secomandi, N. (2001). A Rollout Policy for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Operations Research*, 49 (5), 796–802.
88. Bianchi, L., Birattari, M., Manfrin, M., Mastrolilli, M., Paquete, L., Rossi-Doria, O. and Schiavinotto, T. (2006). Hybrid Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 5, 91-110.
89. Novoa, C. and Storer, R. (2009). An Approximate Dynamic Programming Approach for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 509-515.
90. Rei, W., Gendreau, M. and Soriano, P. (2010). A Hybrid Monte Carlo Local Branching Algorithm for the Single Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Transportation Science*, 44(1), 136–146.
91. Zhang, C., Delleart, N.P., Zhao, L., Van Woenses, T. and Sever, D. (2013). Single Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands: Approximate Dynamic Programming. *Eindhoven University of Technology*, 425, 1-29.

92. Kyriakidis, E.G. and Dimitrakos, T.D. (2015). Single Vehicle Routing Problem with a Predefined Customer Sequence, Stochastic Demands and Partial Satisfaction of Demands. *Operations Research Proceedings*, 157-164.
93. Secomandi, N. and Margot, F. (2009). Reoptimization Approaches for the Vehicle-Routing Problem with Stochastic Demands. *Operational Research*, 57(1), 214–230.
94. Balaprakash, P. Birattari, M., Stützle, T. and Dorigo, M. (2015), Estimation-Based Metaheuristics for the Single Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers. *Computational Optimization and Applications*, 61(2), 463-487.
95. Florio, A., Hartl, R., Minner, S. (2018). Optimal A Priori Tour and Restocking Policy for the Single Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *European Journal Of Operational Research*, 285(1), 172-182.
96. Bertazzi, L. and Secomandi, N. (2018). Faster Rollout Search for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Restocking. *European Journal of Operational Research*, 270(2018), 487-497.
97. Ong, H.L., Ang, B.W., Goh, T.N. and Deny, C.C. (1997). A Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows and Stochastic Demand Constraints. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 14, 1-17.
98. Chang, M.S. (2005). A Vehicle Routing Problem with Time Windows and Stochastic Demands. *Journal of the Chinese Institute of Engineering*, 28(5), 783–794.
99. Erera, A.L., Morales, J.C. and Savelsbergh, M. (2010). The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints. *Transportation Science*, 44(4), 474–492.
100. Lei, H. , Laporte, G. and Guo, B. (2011). The Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Time Windows. *Computers & Operations Research*, 38(12), 1775-1783.
101. Zhang, J., Lam, W.H.K. and Chen, B.W. (2016). On-Time Delivery Probabilistic Models for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Time Windows. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 144-154.
102. Soonpracha, K., Mungwattana, A. and Manisri, T. (2015). A Re-Constructed Meta-Heuristic Algorithm for Robust Fleet Size and Mix The Vehicle Routing Problem with Time Windows under Uncertain Demands. *Evolutionary Systems*, 2, 347-361.
103. Gee, S.B., Arokiasami, W.A., Jiang, J. and Tan, K.C. (2016). Decomposition-Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Soft Computing*, 20(9), 3443-3453.
104. Goel, R., Maini, R. and Bansal, S. (2019). Vehicle Routing Problem with Time Windows Having Stochastic Customer Demands and Stochastic Service Times: Modeling and Solution. *Journal of Computational Science*, 34, 1-10.

105. Hu, C., Lu, J., Liu, X. and Zhang, G. (2018). Robust Vehicle Routing Problem with Hard Time Windows under Demand and Travel Time Uncertainty. *Computational Optimization and Applications*, 61(2), 463-487.
106. Sun, L. and Wang, B. (2018). A Goal-Robust-Optimization Approach for Solving Open Vehicle Routing Problem with Demand Uncertainty. *Wireless Personal Communications*, 103(1), 1059-1075.
107. Lee, C., Lee, K. and Park, S. (2012). Robust Vehicle Routing Problem with Deadlines and Travel Time/Demand Uncertainty. *Journal of Operational Research Society*, 63(9), 1294–1306.
108. Xaingguo, M. and Manying, W. (2015). Optimization Model of the Vehicle Routing of Cold Chain Logistics Based on Stochastic Demands. *Journal of Applied Science and Engineering Innovation*, 2(9), 356-362.
109. Zhang, J., Lam, W.H.K. and Chen, B.W. (2016). On-Time Delivery Probabilistic Models for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Time Windows. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 144-154.
110. Saint-Guillien, M., Solnon, C. and Deville, Y. (2017). The Static and Stochastic VRP with Time Windows and Both Random Customers and Reveal Times. *Applications of Evolutionary Computation*, 110-127.
111. Tillman, F. A. (1969). The Multiple Terminal Delivery Problem with Probabilistic Demands. *Transportation Science*, 3(3), 192-204.
112. Calvet, L., Juan, A.A. and Scheffers, N. (2015, 26-29 May). *Solving the Multi-Depot Vehicle Routing Problem Considering Uncertainty and Risk Factors*. Paper presented at the 6th International Conference on Risk Analysis, Barcelona.
113. Calvet, L., Wang, D., Juan, A. and Bove, L. (2019) Solving the Multidepot Vehicle Routing Problem with Limited Depot Capacity and Stochastic Demands. *International Transactions in Operational Research*, 26(2019), 459-484.
114. Chan, Y. , Carter, W.B. and Burnes, M.D. (2001). A Multiple-Depot, Multiple-Vehicle, Location-Routing Problem with Stochastically Processed Demands. *Computers & Operations Research*, 28(8), 803-826.
115. Tatarakis, A. and Minis, I. (2009). Stochastic Single Vehicle Routing with A Predefined Customer Sequence and Multiple Depot Returns. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 557-571.
116. Zuhori, S.T., Peya, Z.J. and Mahmud, F. (2013). A Novel Three-Phase Approach for Solving Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand. *Algorithms Research*, 1(4), 15-19.
117. Uslu, A., Çetinkaya, C. and İşleyen, S.K., (2017). Vehicle Routing Problem in Post-Disaster Humanitarian Relief Logistics: A Case Study in Ankara. *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, 35(3), 481-499.

118. Christiansen, C.H., Eglese, R.W., Letchford, A.N. and Lysgaard, J. (2016). A Branch-and-Cut-and-Price Algorithm for the Multi-Depot Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Computer & Operations Research*, 50, 30-42.
119. Hou L. and Zhou, H. (2010, 28-31 May). *Stochastic Vehicle Routing Problem with Uncertain Demand and Travel Time and Simultaneous Pickups and Delivery*. Paper presented at the Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization, Huangshan.
120. Hou, L., Zhou, H. and Zhao, J., (2010). A Novel Discrete Differential Evolution Algorithm for Stochastic VRPSPD. *Journal of Computational Information Systems*, 6(8), 2483-2491.
121. Hou, L. and Hou, Z. (2013). A Novel Discrete Differential Evolution Algorithm. *Telkomnika*, 11(4), 1883-1888.
122. Minis, I. and Tatarakis, A. (2011). Stochastic Single Vehicle Routing with Pick Up and A Predefined Customer Sequence. *European Journal of Operational Research*, 213, 37-51.
123. Wang, C. and Qiu, Y. (2011). Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Simultaneous Delivery and Pickup Based on the Cross-Entropy Method. *Advances in Automation and Robotics*, 2, 55-60.
124. Dimitrakos, T.D. and Kyriakidis, E.G. (2015). A Single Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries Continuous Random Demands and Predefined Customer Order. *European Journal of Operational Research*, 244(3), 990-993.
125. Berhan, E. (2016). Stochastic Vehicle Routing Problems with Real Simultaneous Pickup and Delivery Services. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 19, 1-7.
126. Ghilas, V., Demir, E. and Woensel, T.V. (2016). A Scenario-Based Planning for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows, Scheduled Lines and Stochastic Demands. *Transportation Research Part B: Methodological*, 91, 34-51.
127. Zhu, L. ve Sheu, J.B. (2018). Failure-Specific Cooperative Recourse Strategy for Simultaneous Pick up and Delivery Problem with Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, 271(3), 896-912.
128. Tillman F.A. ve Hering, R.W. (1971). A study of look-ahead procedure for solving the multiterminal delivery problem. *Transportation Research*, 5 225–229.
129. Tillman, F.A. ve Cain, T.M. (1972). An upperbound algorithm for the single and multiple terminal delivery problem. *Management Science*, 18, 664–682.
130. Gillett, B.E. ve Johnson, J.G.(1976). Multi-terminal vehicle-dispatch algorithm. *Omega*, 4, 711-718.
131. Laporte, G., Norbert, Y. and Taillefer S. (1988). Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. *Transportation Science*, 22(3), 161–72.

132. Chao, I.M., Golden, B.L. and Wasil, E. (1993). A new heuristic for the multi-depot vehicle routing problem that improves upon best-known solutions. *American Journal of Mathematical and Management Science*, 13, 371-406.
133. Renaud, J., Laporte, G. and Boctor F.F. (1996). A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 23, 229-35.
134. Salhi, S. and Sari, M. (1997). A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. *European Journal of Operational Research*, 103, 95-112.
135. Cordeau, J.F., Gendreau, M. and Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problem, *Networks*, 30, 105-19.
136. Thangiah, S. R. and Salhi, S. (2001). Genetic clustering: An adaptive heuristic for the multi-depot vehicle routing problem, *Applied Artificial Intelligence*, 15, 361-383.
137. Giosa, I.D., Tansini, I.L. and Viera, I.O. (2002). New assignment algorithms for the multi depot vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 977-984.
138. Polacek, M., Hartl, R.F., Doerner, K. and Reimann, M. (2004). A variable neighborhood search for the multi depot vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, 10, 613-627.
139. Jin, T , Guo S , Wang, F and Lim, A. (2004). One-Stage Search for Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Proceedings of the information systems and control conference*, Porto, Portugal, 446.
140. Lim, A. and Wang, F. (2005). Multi-depot vehicle routing problem: A one-stage approach. *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, 2(4), 397-402.
141. Dondo, R., and Cerdá, J. (2007). A cluster-based optimization approach for the multidepot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1478-1507.
142. Bae, S.T., Hwang, H.S., Cho, G.S. and Goan, M.J. (2007). Integrated GA-VRP solver for multi-depot system. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2), 233-240.
143. Crevier, B., Cordeau, J. F. and Laporte, G. (2007). The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 756-773.
144. Ho, W., Ho, G.T.S., Ji, P., and Lau, H.C.W. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4), 548-557.
145. Tsirimpas, P., Tatarakis, A., Minis, I. and Kyriakidis, E.G. (2008). Single Vehicle Routing with A Predefined Customer Sequence and Multiple Depot Returns. *European Journal of Operational Research*, 187, 483-495.

146. Ombuki-Berman, B., and Hanshar, F. T. (2009). Using genetic algorithms for multi depot vehicle routing. *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem Studies in Computational Intelligence*, 161, 77–99.
147. Liu, R., Jiang, Z., Fung R.Y.K., Chen, F. and Liu, X. (2010). Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration. *Computers & Operations Research*, 37, 950–959.
148. Yu, B., Yang, Z.Z. and Xie, J. X. (2011). A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 62, 183–188.
149. Gulczynski, D., Golden, B. and Wasil, E. (2011). The Multi-Depot Split Delivery Vehicle Routing Problem: An Integer Programming-Based Heuristic, New Test Problems and Computational Results. *Computers & Industrial Engineering*, 61, 794–804.
150. Yücenur, G.N. and Demirel, N.Ç. (2011a). A new geometric shape-based genetic clustering algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11859–11865.
151. Yücenur, G.N. and Demirel, N.Ç. (2011b). A hybrid algorithm with genetic algorithm and ant colony optimization for solving multi-depot vehicle routing problems. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 29, 340–350.
152. Ray, S., Soeanu, A., Berger, J. and Debbabi, M. (2014). The Multi-Depot Split-Delivery Vehicle Routing Problem: Model and Solution Algorithm. *Knowl-Based Systems*, 71, 238–265.
153. Salhi, S., Imran, A. and Wassan, N.A. (2014). The Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicle Fleet: Formulation and A Variable Neighborhood Search Implementation. *Computers & Operations Research*, 52(B), 315–325.
154. Contardo, C. and Martinelli, R. (2014). A new exact algorithm for the multi-depot vehicle routing problem under capacity and route length constraints. *Discrete Optimization*, 12, 129–146.
155. Allahyari, S., Salari, M. and Vigo, D. (2015) A Hybrid Metaheuristic Algorithm for the Multi-Depot Covering Tour Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 242, 756–768.
156. Rahimi-Vahed, A., Gabriel Crainic, T., Gendreau, M. and Rei, W. (2015). Fleet-Sizing for Multi-Depot and Periodic Vehicle Routing Problems Using A Modular Heuristic Algorithm. *Computers & Operations Research*, 53, 9–23.
157. Kunnappapdeelert, S. and Kachitvichyanukul, V. (2015). Modified DE Algorithms for Solving Multi-Depot Vehicle Routing Problem With Multiple Pickup and Delivery Requests. In V., Kachitvichyanukul, K. Sethanan, and P., Golinska- Dawson (Eds.), *Toward Sustainable Operations of Supply Chain and Logistics Systems*. Cham: Springer International Publishing, 361–373.

158. Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C. and Taheripour, S. (2016). An Improved Formulation for the Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem. *Operations Research Spectrum*, 38, 175–187.
159. Bae, H. and Moon, I. (2016). Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows Considering Delivery and Installation Vehicles. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 6536-6549.
160. Calvet, L., Ferrer, A., Gomes, M.I., Juan, A.A. and Masip, D. (2016). Combining Statistical Learning with Metaheuristics for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Market Segmentation. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 93-104.
161. Mancini, S. (2016). A Real Life Multi Depot Periodic Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet: Formulation and Adaptive Large Neighborhood Search Based Metaheuristic. *Transportation Research Part C*, 70, 100-112.
162. Oliveira, F.B., Enayatifar, R., Sadaei, H.J., Guimaraes, F.G. and Portvin, J.Y. (2017). A Cooperative Coevolutionary for the Multi Depot Vehicle Routing Problem. *Expert Systems With Applications*, 43, 117-130.
163. Rabbani, M., Pourreza, P., Asl, H.F. and Nouri, N. (2017). A Hybrid Genetic Algorithm for Multi Depot Vehicle Routing Problem with Considering Time Window Repair and Pick Up. *Journal of Modelling Management*, 13(3), 698-717.
164. Soto, M., Sevaux, M., Rossi, A. and Reinholz, A. (2017). Multiple Neighborhood Search, Tabu Search and Ejection Chains for the Multi Depot Open Vehicle Routing Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 107, 211-222.
165. Du, J., Li, X., Yu, L., Dan, R. and Zhou, J. (2017). Multi Depot Vehicle Routing Problem for Hazardous Material Transportation: A Fuzzy Bilevel Programming. *Information Sciences*, 399, 201-218.
166. Nadizadeh, A. (2017). The Fuzzy Multi Depot Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Formulation and A Heuristic Algorithm. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 28(3), 325-345.
167. Bi, X.H.Z. and Tang, W.K.S. (2017). Evolutionary Multi-Objective Multi Depot Vehicle Routing in Logistics. *International Journal Of Computational Intelligence Systems*, 10, 1337-1344.
168. Jabir, E., Panicker, V. and Sridharan, R. (2017). Design and Development of Hybrid Ant Colony Variable Neighborhood Search Algorithm for Multi Depot Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part D*, 57, 422-457.
169. Cantu-Funes, R.C., Salazar, M.A. and Boyer, V. (2018). Multi Depot Periodic Vehicle Routing Problem with Due Dates and Time Windows. *Journal of The Operational Research Society*, 69(2), 296-306.

170. Bezerra, S.N., Souza, S.R. and Souza, M.J.F. (2018). A GVNS Algorithm for Solving the Multi Depot Vehicle Routing Problem. *Electronic Notes In Discrete Mathematics*, 66, 167-174.
171. Alinaghian, M. and Shokouhi, N. (2018). Multi Depot Multi Compartment Vehicle Routing Problem, Solved By Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search. *Omega*, 76, 85-99.
172. Bolanos, R.I., Escobar, J.W. and Echeverri, M.G. (2018). A Metaheuristic Algorithm for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9, 461-478.
173. Li, J., Wang, R., Li, T., Lu, Z. and Pardalos, P.M. (2018). Benefit Analysis of Shared Depot Resources for Multi Depot Vehicle Routing Problem with Fuel Consumption. *Transportation Research Part D*, 59, 417-432.
174. Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D. and Wang, X. (2018). A Multi Depot Two Echelon Vehicle Routing Problem with Delivery Options Arising in the Last Mile Distribution. *European Journal of Operational Research*, 265, 765-778.
175. Lahyani, R., Coelho, L.C. and Renaud, J. (2018). Alternative Formulations and Improved for the Multi Depot Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *OR Spectrum*, 40, 125-157.
176. Agardi, A., Kovacs, L. and Banyai, T. (2019). Optimization of Multi-Depot Periodic Vehicle Routing Problem With Time Window. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 17(4), 96-108.
177. Azadeh, A. and Farrokhl-Asl, H. (2019). The Close – Open Mixed Multi Depot Vehicle Routing Problem Considering Internal and External Fleet of Vehicles. *Transportation Letters*, 11(2), 78-92.
178. Li, Y., Soleimani, H. and Zohal, M. (2019). An Improved Ant Colony Optimization Algorithm for the Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem with Multiple Objectives. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1161-1172.
179. Wang, Y., Assogha, K., Fan, J., Xu, M., Liu, Y. and Wang, H. (2019). Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem with Shared Transportation Resource: Integration of Time-Dependent Speed and Piecewise Penalty Cost. *Journal of Cleaner Production*, 232, 12-29.
180. Li, J., Li, T., Yu, Y., Zhang, Z., Pardalos, P.M., Zhang, Y. and Ma, Y. (2019). Discrete Firefly Algorithm with Compound Neighborhoods for Asymmetric Multi-Depot Vehicle Routing Problem in the Maintenance of Farm Machinery. *Applied Soft Computing Journal*, 81, 1-14.
181. Prabu, U., Ravisasthiri, P., Sriram, R., Malarvizhi, N. and Amudhavel, J. (2019). EODVGA: An Enhanced ODV Based Genetic Algorithm for Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 6(21), 1-7.

182. Gusavac, B.A., Stanojevic, M. and Cangalovic, M. (2019). Optimal Treatment of Agricultural Land Special Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Agricultural Economics*, 65 (12), 569 – 578.
183. Mahmud, N. and Haque, M. M. (2019, 7-9 February). *Solving Multiple Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) using Genetic Algorithm*. Paper presented at International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, Bazar, Bangladesh.
184. Wang, X., Choi, T.M., Li, Z. and Shao, S. (2019). An Effective Local Search Algorithm Multidepot Cumulative Capacited Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Systems*, 1-10.
185. Ramachandiran, R., Ramaprabha, R. and Suresh, J.K. (2019, 29-30 March). *Multi Depot Vehicle Routing Problem using ODV EV Based Genetic Algorithm*. Paper presented at Proceedings of International Conference on Systems Computation Automation and Networking, Pndicherry, India.
186. Lahyani, R., Gouguenheim, A.L. and Coelho, L.C. (2019). A Hybrid Adaptive Large Neighbourhood Search for Multi-Depot Open Vehicle Routing Problems. *International Journal of Production Research*, 57(22), 6963-6976.
187. Fitriana, R., Moengin, P. and Kusumaningrum, U. (2019). Improvement Route for Distribution Solutions MDVRP (Multi Depot Vehicle Routing Problem) using Genetic Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528, 1-8.
188. Ramos, T.R.P., Gomes, M.I. and Póvoa, A.P.B. (2020). Multi-Depot Vehicle Routing Problem: A Comperative Study of Alternative Formulations. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23(2), 103-120.
189. Ramos, T.R.P., Gomes, M.I. and Póvoa, A.P.B. (2020). A New Matheuristic Approach for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Inter-Depot Routes. *OR Spectrum*, 42, 75-110.
190. Brandão, J. (2020). A Memory-Based Iterated Local Search Algorithm for the Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 284, 559-571.
191. Soeanu, A., Ray, S., Berger, J., Boukhtouta, A. and Debbabi, M. (2020). Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Risk Mitigation: Model and Solution Algorithm. *Experts Systems with Applications*, 145, 1-27.
192. Zhen, L., Ma, C., Wang, K., Xiao, L. and Zhang, W. (2020). Multi-Depot Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Release Dates. *Transportation Research Part E*, 135, 1-21.
193. Stodola, P. (2020). Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm Applied to the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Natural Computing*, 19, 463-475.

194. Keçeci, B. (2014). *Heterojen Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Matematiksel Modeller ve Sezgisel Yaklaşımlar*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
195. Halse, K. (1992). *Modeling and Solving Complex Vehcile Routing Problems*. Ph.D thesis, Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Technical University of Denmark, Denmark.
196. Salhi, S. and Nagy, G. (1999). A Cluster Insertion Heuristic for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Backhauling. *Journal of the Operational Research Society*, 50 (10), 1034-1042.
197. Dethloff, J. (2001). Vehicle Routing and Reverse Logistics: The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up. *OR Spektrum*, 23 (1), 79-96.
198. Tang, F.A. and Galvao, R.D. (2002). Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery Service. *Journal of the Operational Research Society of India*, 39, 19-33.
199. Nagy, G. and Salhi, S. (2005). Heuristic Algorithms for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162 (1), 126–141.
200. Crispim, J. and Brandao, J. (2005). Metaheuristics Applied to Mixed and Simultaneous Extensions of Vehicle Routing Problems with Backhauls. *Journal of the Operational Research Society*, 56, 1296-1302.
201. Ropke, S. and Pisinger, D. (2006). A Unified Heuristic for A Large Class of Vehicle Routing Problems with Backhauls. *European Journal of Operational Research*, 171(3), 750-775.
202. Chen, J.F. (2006). Approaches for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups. *The Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 23(2), 141-150.
203. Chen, J.F. and Wu., T.H. (2006). Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups. *The Journal of the Operational Research Society*, 57 (5), 579-587.
204. Montane, F.A.T. and Galvao, R.D. (2006). A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery Service. *Computers and Operations Research*, 33 (3), 595-619.
205. Bianchessi, N. and Righini, G. (2007). Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery. *Computers and Operations Research*, 34 (2), 578-594.
206. Wassan, N.A., Wassan, A.H. and Nagy, G. (2007). A Reactive Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries. *Journal of Combinatorial Optimization*, 15(4), 368–386.

207. Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T. (2009a). A Hybrid Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up Service. *Expert Systems and Applications*, 36 (2), 1070-1081.
208. Ai, J.T. and Kachitvichyanukul, V. (2009). A Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers and Operations Research*, 36, 1693-1702.
209. Gajpal, Y. and Abad, P. (2009). An Ant Colony System (ACS) for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup. *Computers & Operations Research*, 36 (12), 3215–3223.
210. Subramanian, A., Drummond, L.M.A., Bentes, C., Ochi, L.S. and Farias, R. (2010). A Parallel Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers and Operations Research*, 37(11), 1899-1911.
211. Minyong, L. and Erbao, C. (2010). 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.
212. Subramanian, A., Uchoa, E., Pessoa, A.A. and Ochi, L.S. (2011). Branch-and-Cut with Lazy Separation for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Operations Research Letters*, 39, 338-341.
213. Zachariadis, E.E. and Kiranoudis, C.T. (2011). A Local Search Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries. *Expert Systems with Applications*, 38, 2717-2726.
214. Tasan, A.S., and Gen, M. (2012). A Genetic Algorithm Based Approach to Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 755–761.
215. Wang, H-F. and Chen, Y-Y. (2012). A Genetic Algorithm for the Simultaneous Delivery and Pickup Problems with Time Window. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 84–95.
216. Cruz, R.C., Silva, T.C.B., Souza M.J.F., Coelho, V.N., Mine M.T. and Martins, A.X. (2012). GENVNS-TS-CL-PR: A Heuristic Approach for Solving the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 217–224.
217. Zhang, T., Chaovalitwongse, W.A. and Zhang, Y. (2012). Scatter Search for the Stochastic Travel-Time Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries. *Computers & Operations Research*, 39(10), 2277–2290.
218. Göksal, F.P., Karaoğlu, İ., and Altıparmak, F. (2013). A Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 65, 39-53.

219. Liu, R., Xie, X., Augusto, V. and Rodriguez, C. (2013). 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, 475–486.
220. Avcı, M. ve Topaloğlu, Ş. (2015). An Adaptive Local Search Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous and Mixed Pickups and Deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 83, 15–29.
221. Wang, C., Mu, D., Zhao, F. and Sutherland, J.W. (2015). A Parallel Simulated Annealing Method for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup–Delivery and Time Windows. *Computers & Industrial Engineering*, 83, 111–122.
222. Li, J., Pardalos, P.M., Sun, H., Pei, J. and Zhang, Y. (2015). Iterated Local Search Embedded Adaptive Neighborhood Selection Approach for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups. *Expert Systems with Applications*, 42, 3551–3561.
223. Gschwind, T. (2015). A Comparison of Column Generation Approaches to the Synchronized Pickup and Delivery Problem. *European Journal of Operational Research*, 247, 60–71.
224. Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T. (2016). The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries and Two-Dimensional Loading Constraints. *European Journal of Operational Research*, 251 (2), 369–386.
225. Kalaycı, C.B. and Kaya, C. (2016). An Ant Colony System Empowered Variable Neighborhood Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Expert Systems with Applications*, 66, 163–175.
226. Iassinovskaia, G., Limbourg, S. and Riane, F. (2017). The Inventory-Routing Problem of Returnable Transport Items with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery in Closed-Loop Supply Chains. *International Journal Production Economics*, 183, 570–582.
227. Kartal, Z., Hasgöl, S. and Ernst, A.T., (2017), Single Allocation P-Hub Median Location and Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery. *Transportation Research Part E*, 108, 141–159.
228. Wang, X. and Li, X. (2017). Carbon Reduction in the Location Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Simultaneous Pickup–Delivery and Time Windows. *Procedia Computer Science*, 112, 1131–1140.
229. Bayrak, A. ve Özyörük, B. (2017). Bölünmüş Talepli Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi için Karşılaştırmalı Matematiksel Modeller. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 469–479.
230. Samani, M.G. and Motlagh, S.M.H. (2017), A Hybrid Algorithm for A Two-Echelon Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery under Fuzzy Demand. *International Journal of Transportation Engineering*, 5(1), 59–85.

231. Belgin, Ö., Karaoğlu, İ. and Altıparmak, F. (2018). Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Mathematical Model and Heuristic Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 1-16.
232. Li, H., Wang, L., Hei, X., Li, W. And Jiang, Q., (2018). A Decomposition-Based Chemical Reaction Optimization for Multi-Objective Vehicle Routing Problem for Simultaneous Delivery and Pickup with Time Windows. *Memetic Comp*, 10, 103-120.
233. Karimi, H. (2018). The Capacitated Hub Covering Location-Routing Problem for Simultaneous Delivery and Pickup Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 47-58.
234. Majidi, S., Motlagh, S.M.H., Ignatius, J. (2018), Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for Pollution-Routing Problem for Simultaneous Pickup and Delivery. *Soft Computer*, 22, 2851-2865.
235. Nadizadeh, A. and Nasab, H.H. (2018). Modeling and Solving the Capacitated Location-Routing Problem with for Simultaneous Pickup and Delivery. *International Journal of Transportation Engineering*, 6(3), 23.
236. Cömert, E.S., Yazgan, H.R. ve Görgülü, N. (2019). Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yöntemi Önerisi, *International Journal of Advance Enineering Pure Science*, 2, 107-117.
237. Atasagun, G.C. ve Karaoğlu, İ. (2019). Zaman Bağımlı Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Matematiksel Model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 1743-1755.
238. Qin, G., Tao, F., Li, L. and Chen, Z. (2019), Optimization of the Simultaneous Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem Based on Carbon Tax. *Industrial Management and Data System*, 119(9), 2055-2071.
239. Marinelli, M., Caggiani, L., Alnajajreh, A. and Binetti, M. (2019, 5-7 June). A Two-Stage Metaheuristic Approach for Solving the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup/Delivery and Door-to-Door Service. Paper presented at 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Cracow, Poland.
240. Yan, X., Xiao, B. and Zhao, Z. (2019, 19-21 April). *Multi-objective Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery Considering Customer Satisfaction*. Paper presented at International Conference on Smart Manufacturing, Industrial & Logistics Engineering, Hangzhou, China.
241. Jia, T., Jing, Z. and Hong, M. (2019, 17-19 October). *A Genetic Algorithm for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery*. Paper presented at 1st International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology Kunming, China.

242. Nepumuceno, N., Saboia, R.B. and Pinheiro, P.R. (2019). A Fast Randomized Algorithm for the Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Algorithms*, 12(158), 1-12.
243. Madankumar, S. and Rajendran, C. (2019). A Mixed Integer Linear Programming Model for The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup by Heterogeneous Vehicles and Constrained by Time Windows. *Sadhana*, 44(39), 1-14.
244. Hornstra, R.P., Silva, A., Roodbergen, K.J. and Coelho, L.C. (2020). The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Handling Costs. *Computers and Operations Research*, 115, 1-20.
245. Aydoğdu, B. ve Özyörük, B. (2020). Dinamik Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin Çözümü İçin Matematiksel Model ve Sezgisel Yaklaşım: Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş Algoritması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 563-580.
246. Christofides, N. and Eilon, S. (1969). An Algorithm for the Vehicle-dispatching Problem. *Journal of Operational Research Society*, 20, 309-318.
247. Augerat, P., Belenguer, J.M., Benavent, E., Corberan, A. Naddef, D. and Rinaldi, G. (1995). Computational Results with a Branch and Cut Code for the Capacited Vehicle Routing Problem, *Research Report RR949-M*. Artemis-Imag, France, 1-27.
248. Angelelli, E.S. and Mansini, R. (2002). The Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pick-up and Delivery, In A. Speranza and L. N. Vsn Wassenhove (Eds.), *Quantative approaches to distribution logistics and supply chain management*. Berlin: Springer – Verlag, 249-267.
249. Olson, D.L. and Swenseth, S.R. (1987). A Linear Approximation for Chance-Constrained Programming. *The Journal of the Operational Research Society*, 38(3), 261-267.
250. Akdi, Y. (2018). *Matematiksel İstatistiğe Giriş* (1.Basım), Ankara: Gazi Kitabevi, 120.
251. Miller, C.E. (1963). The Simplex Method for Local Seperable Programming. *Recent Advances in Mathematical Programming* (Third edition), Columbus, McGraw-Hill, 15.
252. Akeroyd, A.J. (1966). An Application of Seperable Programming. *The Computer Journal*, 8(4), 344 – 346.
253. Huang, C.H. (2009). An Effective Linear Approximation Method for Seperable Programming Problems. *Applied Mathematics and Computation*, 215(4), 1496-1506.
254. Ağpak, K. and Gökçen, H. (2006), A Chance-Constrained Approach to Stochastic Line Balancing Problem. *European Journal of Operational Research*, 180, 1098-1115.
255. Foroughi, A., Gökçen, H. and Tiacci, L. (2016). The Cost-Oriented Stochastic Assembly Line Balancing Problem: A Chance Constrained Programming Approach. *International Journal of Industrial Engineering*, 23(6), 412-430.



EKLER

EK-1. STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Tillman	1969		✓		✓	✓		
Tillman ve Hering	1971	✓			✓	✓		
Tillman ve Cain	1972	✓			✓	✓		
Gillett ve Johnson	1976	✓			✓	✓		
Stewart ve Golden	1983		✓	✓		✓		
Dror ve Trudeau	1986		✓	✓		✓		
Laporte vd.	1988	✓			✓	✓		
Jaillet ve Odoni	1988		✓	✓		✓		
Laporte vd.	1989		✓	✓		✓		
Dror vd.	1989		✓	✓		✓		
Min	1989	✓		✓				✓
Laporte ve Louveaux	1990		✓	✓		✓		
Halse	1992	✓		✓				✓
Bertsimas	1992		✓	✓		✓		
Bastian ve Kan	1992		✓	✓		✓		
Teodorovi'c ve Pavkovi'c	1992		✓	✓		✓		
Chao vd.	1993	✓			✓	✓		
Dror	1993		✓	✓		✓		
Dror vd.	1993		✓	✓		✓		
Bertsimas vd.	1995		✓	✓		✓		
Yang	1996		✓	✓		✓		
Renaud vd.	1996	✓			✓	✓		
Ong vd.	1997		✓	✓		✓		
Salhi ve Sari	1997	✓			✓	✓		
Cordeau vd.	1997	✓			✓	✓		
Salhi ve Nagy	1999	✓		✓	✓			✓
Hjorring ve Holt	1999		✓	✓		✓		
Yang vd.	2000		✓	✓		✓		
Secomandi	2000		✓	✓		✓		
Secomandi	2001		✓	✓		✓		
Chan vd.	2001		✓		✓	✓		
Laporte vd.	2001		✓	✓		✓		
Dethloff	2001	✓		✓				✓
Thangiah ve Salhi	2001	✓			✓	✓		
Giosa vd.	2002	✓			✓	✓		
Tang ve Galveo	2002	✓		✓				✓
Tang vd.	2003		✓	✓		✓		
Bianchi vd.	2004		✓	✓		✓		
Polacek vd.	2004	✓			✓	✓		
Jin vd.	2004	✓			✓	✓		
Nagy ve Salhi	2005	✓		✓	✓			✓
Crispim ve Brandoa	2005	✓		✓				✓
Chang	2005		✓	✓		✓		
Lim ve Wang	2005	✓			✓	✓		

EK-1 (devam). STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Cheपुरi ve Homem-de Mello	2005		✓	✓		✓		
Bianchi vd.	2006		✓	✓		✓		
Chen ve Wu	2006	✓		✓				✓
Montane ve Galveo	2006	✓		✓				✓
Bianchessi ve Righini	2007	✓		✓				✓
Wassan vd.	2007	✓		✓				✓
Tan vd.	2007		✓	✓		✓		
Ak ve Erera	2007		✓	✓		✓		
Haugland ve Ho	2007		✓	✓		✓		
Dondo ve Cerdá	2007	✓			✓	✓		
Bae vd.	2007	✓			✓	✓		
Crevier vd.	2007	✓			✓	✓		
Ho vd.	2008	✓			✓	✓		
Tsirampas vd.	2008	✓			✓	✓		
Ismail ve Irhamah	2008		✓	✓		✓		
Sungur vd.	2008		✓	✓		✓		
Tsirampas vd.	2008	✓			✓	✓		
Zachariadis vd.	2009	✓		✓				✓
Ai ve Kachitvichyanukul	2009	✓		✓				✓
Gajpal ve Abad	2009	✓		✓				✓
Erera vd.	2009		✓	✓		✓		
Novoa ve Storer	2009		✓	✓		✓		
Tatarakis ve Minis	2009		✓		✓	✓		
Secomandi ve Margot	2009		✓	✓		✓		
Ombuki-Berman ve Hanshar	2009	✓			✓	✓		
Liu vd.	2010	✓			✓	✓		
Subramanian vd.	2010	✓		✓				✓
Mingyong ve Erbao	2010	✓		✓				✓
Hou ve Zhou	2010		✓	✓				✓
Hou vd.	2010		✓	✓				✓
Mendoza vd.	2010		✓	✓		✓		
Rei vd.	2010							
Erera vd.	2010		✓	✓		✓		
Lei vd.	2011		✓	✓		✓		
Juan vd.	2011		✓	✓		✓		
Minis ve Tatarakis	2011		✓	✓			✓	
Wang ve Qiu	2011		✓	✓				✓
Yu vd.	2011	✓			✓	✓		
Gulczynski vd.	2011	✓			✓	✓		

EK-1 (devam). STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Yücenur ve Demirel	2011	✓			✓	✓		
Yücenur ve Demirel	2011	✓			✓	✓		
Subramanian vd.	2011	✓		✓				✓
Zacharidis ve Kiranoudis	2011	✓		✓				✓
Tasan ve Gen	2012	✓		✓				✓
Wang ve Chen	2012	✓		✓				✓
Cruz vd.	2012	✓		✓				✓
Zhang vd.	2012	✓		✓				✓
Moghaddam vd.	2012		✓	✓		✓		
Goodson vd.	2012		✓	✓		✓		
Zuhori vd.	2012		✓		✓	✓		
Lee vd.	2012		✓	✓		✓		
Göksal vd.	2013	✓		✓				✓
Liu vd.	2013	✓		✓				✓
Mendoza ve Villegas	2013		✓	✓		✓		
Marinakis vd.	2013		✓	✓		✓		
Juan vd.	2013		✓	✓		✓		
Gournais vd.	2013		✓	✓		✓		
Zhang vd.	2013		✓	✓		✓		
Hou ve Hou	2013		✓	✓			✓	
Ray vd.	2014	✓			✓	✓		
Salhi vd.	2014	✓			✓	✓		
Jabali vd.	2014		✓	✓		✓		
Zho vd.	2014		✓	✓		✓		
Gauvin vd.	2014		✓	✓		✓		
Ferrucci ve Bock	2014	✓		✓				✓
Contardo ve Martinelli	2014	✓			✓	✓		
Allahyari vd.	2015	✓			✓	✓		
Rahimi-Vahed vd.	2015	✓			✓	✓		
Kunnappadeelert vd.	2015	✓			✓		✓	
Avcı ve Topaloğlu	2015	✓		✓			✓	✓
Wang vd.	2015	✓		✓				✓
Li vd.	2015	✓			✓			✓
Gschwind	2015	✓		✓				✓
Calvet vd.	2015		✓		✓	✓		
Goodson	2015		✓	✓		✓		
Goodson vd.	2015		✓	✓		✓		
Ulmer vd.	2015		✓	✓		✓		
Mendoza vd.	2015		✓	✓		✓		
Marinakis vd.	2015		✓	✓		✓		

EK-1 (devam). STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Kyriakidis ve Dimitrakos	2015		✓	✓		✓		
Soonpracha vd.	2015		✓	✓		✓		
Dimitrakos ve Kyriakidis	2015		✓	✓			✓	
Xiangguo ve Manying	2015		✓	✓		✓		
Biesinger vd.	2015		✓	✓		✓		
Balaprakash vd.	2015		✓	✓		✓		
Lalla Ruiz vd.	2016	✓			✓	✓		
Bae ve Moon	2016	✓			✓	✓		
Calvet vd.	2016	✓			✓	✓		
Mancini	2016	✓			✓	✓		
Zachariadis vd.	2016	✓		✓				✓
Kalaycı ve Kaya	2016	✓		✓				✓
Christiansen vd.	2016		✓		✓	✓		
Sarasola vd.	2016		✓	✓		✓		
Dror	2016		✓	✓		✓		
Marinaki ve Marinakis	2016		✓	✓		✓		
Zhang vd.	2016		✓	✓		✓		
Berhan	2016		✓	✓				✓
Luo vd.	2016		✓	✓		✓		
Biesinger vd.	2016		✓	✓		✓		
Gee vd.	2016		✓	✓		✓		
Calvet vd.	2016		✓	✓		✓		
Zhang vd.	2016		✓	✓		✓		
Ghilas vd.	2016		✓	✓			✓	
Mendoza vd.	2016		✓	✓		✓		
Liu vd.	2016		✓	✓		✓		
Oliveira vd.	2017	✓			✓	✓		
Rabbani vd.	2017	✓			✓		✓	
Soto vd.	2017	✓			✓	✓		
Du vd.	2017	✓			✓	✓		
Nadizadeh	2017	✓			✓			✓
Bi vd.	2017	✓			✓	✓		
Jabir vd.	2017	✓			✓		✓	
Iassinovskaia vd.	2017	✓		✓				✓
Kartal vd.	2017	✓		✓				✓
Wang ve Li	2017	✓		✓				✓
Samani ve Motlagh	2017	✓		✓				✓
Wang vd.	2017		✓	✓		✓		
Qin vd.	2017		✓	✓		✓		
Uslu vd.	2017		✓		✓	✓		
Saint-Guillain vd.	2017		✓	✓		✓		
Pasha vd.	2017		✓	✓		✓		

EK-1 (devam). STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Bayrak ve Özyörük	2017	✓		✓				✓
Cantu-Funes vd.	2018	✓			✓	✓		
Bezarra vd.	2018	✓			✓	✓		
Alinaghian ve Shokoihi	2018	✓			✓	✓		
Bolanos vd.	2018	✓			✓	✓		
Li vd.	2018	✓			✓	✓		
Zhou vd.	2018	✓			✓			✓
Lahyani vd.	2018	✓			✓	✓		
Belgin vd.	2018	✓		✓				✓
Li vd.	2018	✓		✓				✓
Karimi	2018	✓		✓				✓
Majidi vd.	2018	✓		✓				✓
Nadizadeh ve Nasab	2018	✓		✓				✓
Bartazzi ve Secomandi	2018		✓	✓				✓
Louveaux ve Salazar-Gonzalez	2018		✓	✓		✓		
Florio vd.	2018		✓	✓		✓		
Biesinger vd.	2018		✓	✓		✓		
Subramanyam vd.	2018		✓	✓		✓		
Florio vd.	2018		✓	✓		✓		
Zhu ve Sheu	2018		✓	✓				✓
Festa vd.	2018		✓	✓		✓		
Hu vd.	2018		✓	✓		✓		
Sun ve Wang	2018		✓	✓		✓		
Dinh vd.	2018		✓	✓		✓		
Calvet vd.	2019		✓		✓	✓		
Salavati-Khoshghalb vd.	2019		✓	✓		✓		
Salavati-Khoshghalb vd.	2019		✓	✓		✓		
Salavati-Khoshghalb vd.	2019		✓	✓		✓		
Hernandez vd.	2019		✓	✓		✓		
Goel vd.	2019		✓	✓		✓		
Arvianta vd.	2019		✓	✓		✓		
Agardi vd.	2019	✓			✓	✓		
Azadeh ve Farrokhli-Asl	2019	✓			✓	✓		
Li vd.	2019	✓			✓	✓		
Wang vd.	2019	✓			✓	✓		
Li vd.	2019	✓			✓	✓		
Prabu vd.	2019	✓			✓	✓		
Gusavac vd.	2019	✓			✓	✓		
Mahmud ve Haque	2019	✓			✓	✓		

EK-1 (devam). STARP, ÇDARP VE ETD_ ARP konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi

Yazar	Yılı	Deterministik	Stokastik	Tek Depolu	Çok Depolu	Sadece Dağıt	Topla Dağıt	ETD
Wang vd.	2019	✓			✓	✓		
Ramachandiran vd.	2019	✓			✓	✓		
Lahyani vd.	2019	✓			✓	✓		
Fitriana vd.	2019	✓			✓	✓		
Cömert vd.	2019	✓		✓				✓
Atasagun ve Karaoğlu	2019	✓		✓				✓
Qin vd.	2019	✓		✓				✓
Marinelli vd.	2019	✓		✓				✓
Yan vd.	2019	✓		✓				✓
Jia vd.	2019	✓		✓				✓
Nepumuceno vd.	2019	✓		✓				✓
Madankumar ve Rajendran	2019	✓		✓				✓
Ramos vd.	2020	✓			✓	✓		
Ramos vd.	2020	✓			✓	✓		
Brandão	2020	✓			✓	✓		
Soeanu vd.	2020	✓			✓	✓		
Zhen vd.	2020	✓			✓	✓		
Stodola	2020	✓			✓	✓		
Hornstra vd.	2020	✓		✓				✓
Aydoğdu ve Özyörük	2020	✓		✓				✓

EK-2. 10 Müşterili Deterministik Problemin GAMS Kodları

sets

i dugumler /0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11/

k(i) depolar /0,1/

ii(i) musteriler /2*11/

l(i) noktalar /2*11/

iii(i) depo /0,1/;

alias(i,j);

Table tc(i,j)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	0	47	42	50	63	64	35	28	45	37	34	22
1	47	0	15	18	78	77	14	58	66	46	39	34
2	42	15	0	8	86	85	21	60	71	53	46	36
3	50	18	8	0	93	93	28	68	79	61	53	44
4	63	78	86	93	0	4	65	38	18	33	40	51
5	64	77	85	93	4	0	65	38	20	33	40	51
6	35	14	21	28	65	65	0	43	52	33	26	20
7	28	58	60	68	38	38	43	0	18	20	23	24
8	45	66	71	79	18	20	52	18	0	20	26	35
9	37	46	53	61	33	33	33	20	20	0	7	19
10	34	39	46	53	40	40	26	23	26	7	0	13
11	22	34	36	44	51	51	20	24	35	19	13	0

Table m(i,j)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Parameter d(ii) /2 52, 3 50,4 296,5 235,6 166,7 340,8 132,9 1022,10 1500,11 218/

Parameter p(ii) /2 12,3 10,4 104,5 65,6 9,7 10,8 18,9 78,10 169,11 7/

Parameter cap /3750/

Parameter depocap(k) /0 6000,1 6000/

Parameter c(j)/

2 52

3 50

4 296

5 235

6 166

7 340

8 132

9 1022

EK-2 (devam). 10 Müşterili Deterministik Problemin GAMS Kodları

```

10 1500
11 218/
Parameter e(j)/
2 12
3 10
4 104
5 65
6 9
7 10
8 18
9 78
10 169
11 7/;
Binary variables
x(i,j)
y(i,j)
;
Positive variables
u(i)
v(i)
n(k);
Variable
z;
Equations
amac,kisit1,kisit2,kisit3,kisit4,kisit5,kisit6,kisit7,kisit8,kisit9,kisit10,kisit11,kisit12,kisit13,
kisit14,kisit15,kisit16;
amac..z=e=sum((i,j), x(i,j)*tc(i,j));
kisit1(ii)..sum(j,m(ii,j)*x(ii,j))=e=1;
kisit2(i)..(sum(j,x(i,j)*m(i,j)))-(sum(j,x(j,i)*m(j,i)))=e=0;
kisit3(ii)..sum(k,y(ii,k))=e=1;
kisit4(ii,k)..x(ii,k)=l=y(ii,k);
kisit5(l,ii,k)$ (ord(l)<>ord(ii)).. x(l,ii)+y(l,k)+sum(iii$(ord(iii)<>ord(k)), y(ii,iii))=l=2;
kisit6(ii,l)$ (ord(l)<>ord(ii))..u(l)-u(ii)+cap*x(ii,l)+(cap-d(ii)-c(l))*x(l,ii)=l=cap-d(ii);
kisit7(ii,l)$ (ord(l)<>ord(ii))..v(ii)-v(l)+cap*x(ii,l)+(cap-p(ii)-e(l))*x(l,ii)=l=cap-e(l);
kisit8(ii)..u(ii)+v(ii)-d(ii)=l=cap;
kisit9(ii)..d(ii)+sum(l$(ord(l)<>ord(ii)), c(l)*x(ii,l))=l=u(ii);
kisit10(ii)..p(ii)+sum(l$(ord(l)<>ord(ii)), e(l)*x(l,ii))=l=v(ii);
kisit11(ii)..cap-((cap-d(ii))*sum(k,x(ii,k)))=g=u(ii);
kisit12(ii)..cap-((cap-p(ii))*sum(k,x(k,ii)))=g=v(ii);
kisit13(k)..sum(ii,d(ii)*y(ii,k))=l=depocap(k);
kisit14(ii,k)..x(k,ii)=l=y(ii,k);
kisit15(k)..sum(i,x(i,k))=e=n(k);
kisit16(k)..sum(j,x(k,j))=e=n(k);

option resLim=7200;
model arp /all/;
solve arp using MIP minimizing z;

```

EK-3. 15 müşteriye doğrusallaştırılmış modelin GAMS kodları

sets

i dugumler /0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16/

k(i) depolar /0,1/

ii(i) musteriler /2*16/

l(i) noktalar /2*16/

iii(i) depo /0,1/

•

alias(i,j);

Table tc(i,j)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	14	21	33	17	14	11	26	22	23	28	12	8	29	18	25	22
1	14	0	12	19	31	22	17	23	12	24	34	12	21	42	27	36	19
2	21	12	0	15	37	21	28	35	22	16	28	11	25	50	38	35	9
3	33	19	15	0	50	36	35	35	21	31	43	25	38	61	46	51	23
4	17	31	37	50	0	20	21	37	38	33	31	27	13	15	18	19	35
5	14	22	21	36	20	0	25	40	33	12	14	11	9	35	30	15	16
6	11	17	28	35	21	25	0	16	18	34	40	22	18	27	10	34	32
7	26	23	35	35	37	40	16	0	14	46	54	33	34	40	22	51	41
8	22	12	22	21	38	33	18	14	0	36	46	24	30	45	28	46	30
9	23	24	16	31	33	12	34	46	36	0	12	13	21	48	41	23	8
10	28	34	28	43	31	14	40	54	46	12	0	22	23	46	44	16	20
11	12	12	35	25	27	11	22	33	24	13	22	0	14	40	30	26	10
12	8	21	22	38	13	9	18	34	30	21	23	14	0	27	21	17	23
13	29	42	16	61	15	35	27	40	45	48	46	40	27	0	18	32	50
14	18	27	28	46	18	30	10	22	28	41	44	30	21	18	0	35	40
15	25	36	11	51	19	15	34	51	46	23	16	26	17	32	35	0	30
16	22	19	25	23	35	16	32	41	30	8	20	10	23	50	40	30	0

•

Table m(i,j)

[illegible]

EK-3 (devam). 15 müşterili doğrusallaştırılmış modelin GAMS kodları

Parameter d(ii) /2 7,3 30,4 16,5 9,6 21,7 15,8 19,9 23,10 11,11 5,12 19,13 29,14 23,15
21,16 10/

Parameter p(ii) /2 18,3 16,4 8,5 5,6 7,7 14,8 18,9 9,10 12,11 2,12 15,13 2,14 16,15 10,16
18/

parameter h(ii)/2 1.8,3 1.6,4 0.8,5 0.5,6 0.7,7 1.4,8 1.8,9 0.9,10 1.2,11 0.2,12 1.5,13 0.2,14
1.6,15 1.0,16 1.8/

Parameter cap /85/

parameter std /1.96/

Parameter depocap(k) /0 300,1 300/

Parameter c(j)/

2 7

3 30

4 16

5 9

6 21

7 15

8 19

9 23

10 11

11 5

12 19

13 29

14 23

15 21

16 10/

;

Parameter e(j)/

2 18

3 16

4 8

5 5

6 7

7 14

8 18

9 9

10 12

11 2

12 15

13 2

14 16

15 10

16 18/

;

Parameter o(j)/

2 1.8

3 1.6

4 0.8

5 0.5

EK-3 (devam). 15 müşteriye doğrusallaştırılmış modelin GAMS kodları

```

6 0.7
7 1.4
8 1.8
9 0.9
10 1.2
11 0.2
12 1.5
13 0.2
14 1.6
15 1.0
16 1.8/
;
Binary variables
x(i,j)
y(i,j);
Positive variables
u(i)
v(i)
n(k);
Variable
z;
Equations
amac,kisit1,kisit2,kisit3,kisit4,kisit5,kisit6,kisit7,kisit8,kisit9,kisit10,kisit11,kisit12,kisit13,
kisit14,kisit15,kisit16;
amac..z=e=sum((i,j), x(i,j)*tc(i,j));
kisit1(ii)..sum(j,m(ii,j)*x(ii,j))=e=1;
kisit2(i)..(sum(j,x(i,j)*m(i,j)))-(sum(j,x(j,i)*m(j,i)))=e=0;
kisit3(ii)..sum(k,y(ii,k))=e=1;
kisit4(ii,k)..x(ii,k)=l=y(ii,k);
kisit5(l,ii,k)$(ord(l)<>ord(ii)).. x(l,ii)+y(l,k)+sum(iii$(ord(iii)<>ord(k)), y(ii,iii))=l=2;
kisit6(ii,l)$(ord(l)<>ord(ii))..u(l)-u(ii)+cap*x(ii,l)+(cap-d(ii)-c(l))*x(l,ii)=l=cap-d(ii);
kisit7(ii,l)$(ord(l)<>ord(ii))..v(ii)-v(l)+cap*x(ii,l)+cap*x(l,ii)-
(x(l,ii)*(p(ii)+e(l)))+std*(o(l)-(x(l,ii)*(h(ii)+o(l)))) =l= cap-e(l);
kisit8(ii)..u(ii)+v(ii)-d(ii)=l=cap;
kisit9(ii)..d(ii)+sum(l$(ord(l)<>ord(ii)), c(l)*x(ii,l))=l=u(ii);
kisit10(ii)..p(ii)+sum(l$(ord(l)<>ord(ii)),e(l)*x(l,ii))+std*(h(ii)+sum(l$(ord(l)<>ord(ii)),o(l)
)*x(l,ii))=l=v(ii);
kisit11(ii)..cap-((cap-d(ii))*sum(k,x(ii,k)))=g=u(ii);
kisit12(ii)..cap-
cap*(sum(k,x(k,ii)))+p(ii)*(sum(k,x(k,ii)))+std*(h(ii)*(sum(k,x(k,ii))))=g=v(ii);
kisit13(k)..sum(ii,d(ii)*y(ii,k))=l=depocap(k);
kisit14(ii,k)..x(k,ii)=l=y(ii,k);
kisit15(k)..sum(i,x(i,k))=e=n(k);
kisit16(k)..sum(j,x(k,j))=e=n(k);
option resLim=7200;
model arp /all/;
solve arp using MIP minimizing z;
```

EK-4. Stokastik ile deterministik modelin karşılaştırılması için çözülen örnek

sets

i dugumler /0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21/

k(i) depolar /0,1/

ii(i) musteriler /2*21/

l(i) noktalar /2*21/

iii(i) depo /0,1/

;

alias(i,j);

Table tc(i,j)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0	0	14	21	33	17	14	11	26	22	23	28	12	8	29	18	25	22	17	15	32	32	32
1	14	0	12	19	31	22	17	23	12	24	34	12	21	42	27	36	19	31	28	46	21	27
2	21	12	0	15	37	21	28	35	22	16	28	11	25	50	38	35	9	34	36	51	12	15
3	33	19	15	0	50	36	35	35	21	31	43	25	38	61	46	51	23	48	47	64	8	24
4	17	31	37	50	0	20	21	37	38	33	31	27	13	15	18	19	35	8	8	15	49	45
5	14	22	21	36	20	0	25	40	33	12	14	11	9	35	30	15	16	15	23	32	33	25
6	11	17	28	35	21	25	0	16	18	34	40	22	18	27	10	34	32	25	15	35	38	41
7	26	23	35	35	37	40	16	0	14	46	54	33	34	40	22	51	41	41	30	50	40	50
8	22	12	22	21	38	33	18	14	0	36	46	24	30	45	28	46	30	39	32	52	26	37
9	23	24	16	31	33	12	34	46	36	0	12	13	21	48	41	23	8	27	35	44	25	13
10	28	34	28	43	31	14	40	54	46	12	0	22	23	46	44	16	20	24	36	39	37	24
11	12	12	35	25	27	11	22	33	24	13	22	0	14	40	30	26	10	23	26	40	23	20
12	8	21	22	38	13	9	18	34	30	21	23	14	0	27	21	17	23	10	14	26	37	33
13	29	42	16	61	15	35	27	40	45	48	46	40	27	0	18	32	50	22	14	14	62	59
14	18	27	28	46	18	30	10	22	28	41	44	30	21	18	0	35	40	24	10	29	48	50
15	25	36	11	51	19	15	34	51	46	23	16	26	17	32	35	0	30	11	25	23	47	37
16	22	19	25	23	35	16	32	41	30	8	20	10	23	50	40	30	0	31	36	48	18	10
17	17	31	50	48	8	15	25	41	39	27	24	23	10	22	24	11	31	0	14	17	46	40
18	15	28	38	47	8	23	15	30	32	35	36	26	14	14	10	25	36	14	0	20	47	46
19	32	46	35	64	15	32	35	50	52	44	39	40	26	14	29	23	48	17	20	0	63	57
20	32	21	9	8	49	33	38	40	26	25	37	23	37	62	48	47	18	46	47	63	0	17
21	32	27	34	24	45	25	41	50	37	13	24	20	33	59	50	37	10	40	46	57	17	0

;

Table m(i,j)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

EK-5 (devam). Stokastik ile deterministik modelin karşılaştırılması için çözülen örnek

```

13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1
14 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1
15 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1
16 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
17 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1
18 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1
19 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1
20 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1
21 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0

```

;

Parameter d(ii) /2 6,3 8,4 17,5 16,6 7,7 16,8 7,9 5,10 12,11 7,12 2,13 19,14 28,15 5,16 6,17 4,18 12,19 3,20 21,21 9/

Parameter p(ii) /2 4,3 24,4 10,5 7,6 15,7 10,8 18,9 3,10 17,11 13,12 28,13 22,14 20,15 27,16 8,17 25,18 11,19 2,20 10,21 23/

parameter h(ii)/2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 0,10 0,11 0,12 0,13 0,14 0,15 0,16 0,17 0,18 0,19 0,20 0,21 0/

Parameter cap /150/

parameter std /3.49/

Parameter depocap(k) /0 500,1 500/

Parameter c(j)/

```

2 6
3 8
4 17
5 16
6 7
7 16
8 7
9 5
10 12
11 7
12 2
13 19
14 28
15 5
16 6
17 4
18 12
19 3
20 21
21 9/

```

Parameter e(j)/

```

2 4
3 24
4 10
5 7
6 15
7 10

```

EK-5 (devam). Stokastik ile deterministik modelin karşılaştırılması için çözülen örnek

	8	18
	9	3
	10	17
	11	13
	12	28
	13	22
	14	20
	15	27
	16	8
	17	25
	18	11
	19	2
	20	10
	21	23/
Parameter $\alpha(j)/$	2	0
	3	0
	4	0
	5	0
	6	0
	7	0
	8	0
	9	0
	10	0
	11	0
	12	0
	13	0
	14	0
	15	0
	16	0
	17	0
	18	0
	19	0
	20	0
	21	0/

;



GAZİ GELECEKTİR..