

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

**BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIMI PROBLEMİNİN ÇOK
DEPOLU AÇIK UÇLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ
OLARAK MODELLENMESİ VE ÇÖZÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ GÖRKEM ÖZEN

DENİZLİ, OCAK - 2020

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



**BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIMI PROBLEMİNİN ÇOK
DEPOLU AÇIK UÇLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ
OLARAK MODELLENMESİ VE ÇÖZÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ GÖRKEM ÖZEN

DENİZLİ, OCAK - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

DENİZ GÖRKEM ÖZEN tarafından hazırlanan “**BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIMI PROBLEMİNİN ÇOK DEPOLU AÇIK UÇLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ OLARAK MODELLENMESİ VE ÇÖZÜLMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20.01.2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

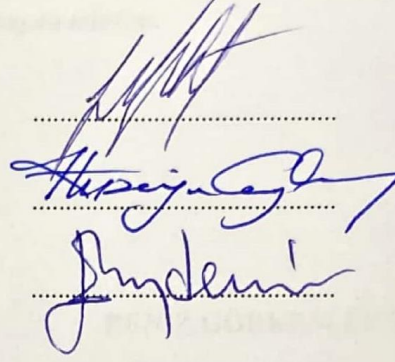
Jüri Üyeleri

İmza

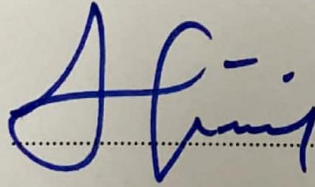
Danışman
Doç. Dr. Olcay POLAT

Üye
Prof. Dr. Hüseyin CEYLAN

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Erdal AYDEMİR



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
~~19/01/2020~~ tarih ve ~~08/11~~..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

DENİZ GÖRKEM ÖZEN



ÖZET

**BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIMI PROBLEMİNİN ÇOK DEPOLU
AÇIK UÇLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ OLARAK
MODELLENMESİ VE ÇÖZÜLMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DENİZ GÖRKEM ÖZEN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. OLCAY POLAT)**

DENİZLİ, OCAK - 2020

Sanayileşme, şehirleşme ve nüfus yoğunluğunun artması, şehir merkezlerinde yerleşim alanlarının sıkışmasına ve şehirlerin fiziki sınırlarının genişlemesine yol açmaktadır. Mekansal büyüme ve gelişme, yerleşim alanlarını birbirinden uzaklaştırarak ulaşım maliyetlerinin artmasına ve taşıma hizmetinin etkinliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte nüfusun yoğun olduğu şehirlerin bazı kesimlerinde şehir içi seyahat, şehirlerarası seyahatten daha uzun zaman almaktadır. Yapılan çalışma Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Probleminin, Besleyici Otobüs Ağ Tasarım uygulaması kapsamındadır. Açık uçlu araç rotalama probleminde, araçlar klasik araç rotalama probleminde olduğu gibi, son servis noktasından sonra depoya dönmezler. Bu tip problemlerde, rotalar merkez depo ile başlamakta, talep noktası ile sona ermektedir. Bir başlangıç depo noktasından, dağıtım yapılacak noktalara bırakılacak mallar veya personel, araca yüklenir ve belirlenen sırada noktalara uğranılır. Aracın son uğranılan noktada kalacağı varsayılır. Tez çıktısı şehir içi ulaştırma sistemini geliştirmeyi hedeflemektedir. Söz konusu yolcuların duraklar arası seyahatlerinde; raylı sistemle bütünleşik olarak işlemesi, araçların rotalarını en küçükleyerek, mümkün olan en az aracı kullanarak dağıtılmasını sağlamak, ulaşım maliyetlerini en küçüklemek ve aynı zamanda yolcu memnuniyetini sağlamak amaçlanmaktadır. Bununla ilgili olarak matematiksel model geliştirilmiş ve farklı veri setlerindeki vakalar için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan yola çıkılarak, tez içeriğinde ele alınan problem gerçek karar alıcılarına fayda sağlayabilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Çok depolu açık uçlu araç rotalama, Şehir içi ulaşım, Matematiksel model

ABSTRACT

MODELING AND SOLUTION OF THE FEEDER BUS NETWORK DESIGN PROBLEM AS A MULTI DEPOT OPEN VEHICLE ROUTING PROBLEM

MSC THESIS

DENİZ GÖRKEM ÖZEN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

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

DENİZLİ, JANUARY 2020

Industrialization, urbanization and the increase in population density lead to contraction of residential areas in the city centers and expansion of the physical boundaries of cities. Spatial growth and development causes the transportation costs to increase and the efficiency of the transportation service by decreasing the settlement areas. However, in some parts of the densely populated cities, urban travel takes longer than intercity travel. This study is in the scope of the Feeder Bus Network Design application of the Multi Depot Open Vehicle Routing Problem. In an open vehicle routing problem, vehicles do not return to the depot after the last service point, as in a conventional vehicle routing problem. In such problems, the routes start with the central depot and end with the demand point. From an initial depot point, the goods or personnel to be left to the points to be distributed are loaded into the vehicle and stopped at the points in the specified order. It is assumed that the vehicle will remain at the last stop. The thesis output aims to improve the urban transportation system. For the passengers traveling between stops; The aim of the project is to integrate with the rail system, to ensure that vehicles are distributed by minimizing their routes, using the least possible vehicles, minimizing transportation costs and ensuring passenger satisfaction. A mathematical model was developed and the results were compared for different data sets. Based on the results, this study will be beneficial for the real decision makers of the problem discussed.

KEYWORDS: Multi depot open vehicle problem, Urban transportation, Mathematical model

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ.....	3
2.1 Gezgin Satıcı Problemi.....	3
2.2 Araç Rotalama Problemi	4
2.3 Araç Rotalama Probleminin Bileşenleri	8
2.3.1 Talep Yapısı	8
2.3.2 Malzeme Tipi	8
2.3.3 Dağıtım/Toplama Noktaları	8
2.3.4 Araç Filosu.....	9
2.4 Araç Rotalama Probleminin Lojistikteki Yeri ve Kullanım Alanları.	10
2.5 Araç Rotalama Problemi Türleri	11
2.5.1 Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi	12
2.5.2 Çok Depolu Araç Rotalama Problemi	14
2.5.3 Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi.....	17
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	19
4. BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIM PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ.....	40
4.1 Problemin Tarifi	40
4.2 Formülasyon ve Matematiksel Model	43
5. UYGULAMA	47
5.1 Vaka Çalışmaları	47
5.1.1 Vaka 1	47
5.1.2 Vaka 2	49
5.1.3 Vaka 3	51
5.1.4 Vaka 4	54
5.1.5 Vaka 5	56
5.2 Test Problemleri	59
5.3 Duyarlılık Analizi.....	63
5.3.1 Otobüs Kapasitesi ve Maksimum Rota Uzunluğu Değ. Etkisi....	63
5.3.2 Otobüs İşletim Hızı ve Otobüs İşletim Maliyeti Değ. Etkisi.....	64
5.3.3 Otobüs Binme Maliyeti ve Otobüs Bekleme Maliyeti Değ. Etk. 65	
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
7. KAYNAKLAR.....	71
8. EKLER.....	78
EK A. Düğüm Koordinatları	78
9. ÖZGEÇMİŞ	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Farklı çeşit ARP'ler için müşteri-depo bağlantıları	18
Şekil 3.1: Kuan ve diğ. (2004) tarafından çözülen problem ağ tasarımı.....	39
Şekil 4.1: A_ARP için istasyonlar ile otobüs durakları bağlantısı.....	41
Şekil 5.1: Mesafe bazlı model ağ tasarımı çözüm sonucu	48
Şekil 5.2: Vaka 2 model ağ tasarımı çözüm sonucu	51
Şekil 5.3: Vaka 3 model ağ tasarımı çözüm sonucu	53
Şekil 5.4: Vaka 4 model ağ tasarımı çözüm sonucu	55
Şekil 5.5: Vaka 5 model ağ tasarımı çözüm sonucu	58

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: GAMS programında kodlanan model çıktılarının literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması tablosu.....	31
Tablo 3.2: Beslemeli otobüs ağ tasarım model verileri.....	38
Tablo 5.1: Vaka 1 verileri	47
Tablo 5.2: Otobüs durak koordinatları ve talep miktarları.....	49
Tablo 5.3: Demiryolu istasyonlarının koordinatları.....	50
Tablo 5.4: Vaka 2 verileri	50
Tablo 5.5: Vaka 2 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri.....	50
Tablo 5.6: Vaka 2 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları	51
Tablo 5.7: Vaka 3 verileri	52
Tablo 5.8: Vaka 3 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri.....	52
Tablo 5.9: Vaka 3 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları	53
Tablo 5.10: Vaka 4 verileri	54
Tablo 5.11: Vaka 4 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri.....	54
Tablo 5.12: Vaka 4 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları	55
Tablo 5.13: Vaka 5 otobüs durak koordinatları ve talepleri	56
Tablo 5.14: Vaka 5 demiryolu istasyon koordinatları.....	56
Tablo 5.15: Vaka 5 verileri	57
Tablo 5.16: Vaka 5 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri.....	57
Tablo 5.17: Vaka 5 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları	58
Tablo 5.18: Vakalar toplam rota uzunlukları ve toplam maliyet karşılaştırma.....	58
Tablo 5.19: Test probleminde sabit olarak alınan veriler	59
Tablo 5.20: 74 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	59
Tablo 5.21: 74 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	60
Tablo 5.22: 100 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	61
Tablo 5.23: 100 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	61
Tablo 5.24: 150 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	62
Tablo 5.25: 150 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları.....	63
Tablo 5.26: Otobüs kapasitesi ve rota uzunluğu değişimi etkisi.....	64
Tablo 5.27: Otobüs hızı ve otobüs işletme maliyeti değişimi etkisi	65
Tablo 5.28: Otobüs binme ve otobüs bekleme maliyeti değişimi etkisi	66
Tablo 5.29: Toplam otobüs binme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi.....	66
Tablo 5.30: Toplam otobüs bekleme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi	67
Tablo A.1: Otobüs Durakları Koordinatları (Kuah ve Perl 1989).....	78
Tablo A.2: İstasyon Noktaları Koordinatları (Kuah ve Perl 1989).....	79

KISALTMA LİSTESİ

ÇDA_ARP	:	Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi
GSP	:	Gezgin Satıcı Problemi
ARP	:	Araç Rotalama Problemi
GA	:	Genetik Algoritma
A_ARP	:	Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi
ÇD_ARP	:	Çok Depolu Araç Rotalama Problemi
ÇDH_ARP	:	Çok Depolu Heterojen Filolu Araç Rotalama Probl.
DKA	:	Değişken Komşuluk Arama
DSA	:	Dal-Sınır Algoritması
AHP	:	Analitik Hiyerarşi Problemi
MILP	:	Karmaşık Tam Sayılı Doğrusal Programlama
PSO	:	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
TA	:	Tabu Arama
ÇAPSO	:	Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
BTA	:	Benzetilmiş Tavlama Algoritması
BOAT	:	Besleyici Otobüs Ağ Tasarım
BOATÇ	:	Besleyici Otobüs Ağ Tasarım ve Çizelgeleme
KKA	:	Karınca Kolonisi Algoritması
ÇZA_ARP	:	Çok Depolu Zaman Pencereci Açık Uçlu ARP

ÖNSÖZ

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

Deniz Görkem ÖZEN

1. GİRİŞ

Ulaşım, insanların sürekli olarak kullandığı önemli bir kavramdır. İhtiyaçlar dahilinde öncelikli olarak insanların bir yerden bir yere kolay ve hızlı bir şekilde gidebilmeleri amacıyla ulaşım araçları ortaya çıkmıştır. Önceleri bireyler kendi araçları ile seyahat edip istedikleri yerlere gitmekteydiler. Ulaşım araçlarının yaygınlaşması ve çeşitlenmesi sonrasında ulaşım hizmetleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu hizmetler sayesinde insanlar, bir yerden bir yere gidebilmek için kendi araçları olmadan verilen hizmet aracılığıyla ulaşımını gerçekleştirmektedirler.

Ulaşım hizmetlerinin çeşitlenmesi ile birlikte farklı ulaşım araçları ortaya çıkmıştır. Ulaşım hizmetleri içerisinde en çok kullanılan ulaşım araçları, şehir içi veya şehirlerarası otobüsler, trenler, uçaklar ve vapurlardır.

Artan nüfus ve gelişen şehirleşme ile birlikte bir yerden bir yere gitmek, ulaştırma sistemlerinin plansız tasarlanması ile birlikte daha zor olmaya başlamıştır. Bunun sonucunda özel araç kullanımı artmaktadır. Bu artış da trafik problemlerini arttırmaktadır. Karayolu ulaşımı, dünyanın çoğu ülkesinde trafik açısından büyük problemler oluşturmaktadır. Trafik problemlerinin farklı nedenleri bulunmaktadır. Gelişmiş ülkelerde otomobil sahipliğinin fazla olması trafik akışını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Aynı zamanda daha az gelişmiş ülkelerde kırsal kesimden şehirlere yaşanan fazla göç ile ortaya çıkan kalabalıklaşma ulaştırma sistemlerinin kurulmasını güçleştirmektedir.

İnsanların toplu taşıma araçlarından almış oldukları hizmetler, onları fiziksel olarak ve moral açısından etkilenmesine sebep olmaktadır. Örneğin, bir kişi sabahı işe gitmek için durağa gelen bir kişi, beklemiş olduğu ulaşım aracının dolu gelmesi sonucunda araca binemez ise bir sonraki aracı bekleyeceği için soğuğa maruz kalacak ve fiziksel olarak etkilenecek, araca binemediği için ve işe geç kalacağı için ise motivasyonu düşecek ve psikolojik olarak etkilenecektir. Dolayısıyla fiziksel ve moral olarak etkilenen bireyler iş hayatında veya eğitim hayatında bundan olumsuz

olarak etkilenmektedirler. Bundan dolayı, toplu taşıma sistemlerinin kalitesi ve performansı takip edilmeli, verimli ulaşım hizmeti sağlanmalıdır.

Şehir içi ulaşımda toplu taşıma sistemlerini incelediğimizde, çalışan her araç ve kat edilen mesafe hizmet sağlayıcıya maliyet oluşturmaktadır. Toplu taşıma araçlarının doluluk oranının az olması veya olması gerekenin üstünde olması istenen bir durum değildir. Doluluk oranının az olması demek hatta fazladan çalıştırılan bir aracı işaret etmekte ve bu hizmet sağlayıcıya fazla maliyet getirmektedir. Doluluk oranının fazla olması ise hizmeti kullanan kişiler açısından istenen bir durum değildir ve kullanıcıları olumsuz olarak etkilemektedir. Bu durumların çıkış kaynağı ise oluşturulan durakların taleplerinin doğru olarak ölçülmemesi ve yanlış rota oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Amaç, hizmet kullanıcılarını ulaşmak istedikleri noktaya en kısa sürede, konforlu bir şekilde ve hizmet sağlayıcı açısından en az maliyetli olacak şekilde ulaştırmaktır. Dolayısıyla iyi bir gözlem ve analiz ile kaliteli bir toplu taşıma ağının kurulması hedeflenmelidir.

Toplu taşımanın da içinde bulunduğu uygun sistem tasarımının yapılabilmesi için araç rotalama problemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otobüs duraklarının ve raylı sistem istasyonların bulunduğu birleşik bir sistem analiz edilecektir. Mevcut toplu taşıma sistemi içerisindeki duraklar baz alınıp, oluşturulacak bir raylı sistem ile bağlantıları kurularak, araç rotalama probleminin bir çeşidi olan Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi ile modelleme yapılacaktır. Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi modelinin çalışması kapsamında, model içindeki araç sayısı, hız, maliyet parametreleri ve maksimum rota uzunluğu gibi etkenlerin değiştirilmesi ile farklı alternatifler üzerinde karşılaştırmalar yapılacaktır.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde araç rotalama probleminin tanımı, yapısı, kullanım alanları, türleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde literatürdeki çalışmalara değinilmiştir. Dördüncü bölümde Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi anlatılmış ve literatürde yapılmış farklı konulardaki uygulamalarından bahsedilmiştir. Beşinci ve altıncı bölümde problemin tanımlaması yapıp uygulamalı bir şekilde çözümü yapılmıştır. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ

2.1 Gezgin Satıcı Problemi

Gezgin Satıcı Probleminde (GSP) bir satış personelinin veya bir aracın belli bir nokta veya şehirden başlayıp içerisinde bulunduğu sistemde yer alan diğer tüm nokta veya şehirleri sadece bir kez ziyaret ederek başlangıç noktası veya şehrine dönmesi sırasında yapmış olduğu toplam tur mesafesinin (veya maliyetinin) minimize edilmesi amaçlanır. Bu problemin uygulanması aşamasında her bir noktadan diğer tüm noktalara olan uzaklıkların bilinmesi gerekmektedir. Toplam nokta sayısının n adet olduğu durumda, birinci nokta için $(n-1)$ adet, ikinci nokta için $(n-2)$ adet, üçüncü nokta için $(n-3)$ adet gidilebilecek nokta vardır. Burada n , problemin boyutunu ifade etmektedir ve problem için olabilecek tur sayısı $(n-1)!$ adettir. Buradan hareketle nokta sayısının az olduğu durumlarda kesin çözüme ulaşmak mümkün olabilirken, nokta sayısı arttıkça problem için alternatif çözüm sayısı hızla artmakta ve optimum çözüm bulunabilmesi için çok fazla zaman gerekmektedir. Bu sebeple sezgisel ve meta sezgisel yöntemler kullanılarak kısa sürede optimum veya optimuma yakın tatmin edici sonuçlar elde edilebilmektedir.

GSP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (2.1) gezgin satıcının sistemdeki müşterileri ziyaret ederken seyahat edeceği toplam mesafenin minimum olmasını ifade etmektedir. Kısıt (2.2) ve kısıt (2.3) sırasıyla her bir şehrin ziyaret edilmesini ve ziyaret edilen her şehirden başka bir şehre gitmek üzere o noktadan çıkış yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.4) alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.5) aracın ziyaret etmiş olduğu şehirden aynı şehre tekrar bir rota oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.6) iki şehir arasında bağlantı olduğunda 1, aksi durumda 0 değerini alan karar değişkenini ifade etmektedir. Kısıt (2.7) alt tur oluşumunu önleyen yardımcı karar değişkeninin negatif olmamasını sağlamaktadır.

İndisler ve notasyonlar

n : şehir sayısı

N : şehirler kümesi

i, j : şehir (1,2, ..., n)

Parametreler

c_{ij} : i . şehir ile j . şehir arasındaki mesafe

M : büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ şehirden } j. \text{ şehire seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i, j \in N$$

u_i : Alt tur engellemek için kullanılan değişken $\forall i \in N$

MATEMATİKSEL MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } Z = \sum_i^n \sum_j^n c_{ij} * x_{ij} \quad (2.1)$$

Kısıtlar

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

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

$$u_i - u_j + n * x_{ij} \leq n - 1 \quad 2 \leq i, j \leq n, \quad i \neq j \quad (2.4)$$

$$d_{ii} = M \quad \forall i \in N \quad (2.5)$$

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

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (2.7)$$

2.2 Araç Rotalama Problemi

Araç Rotalama Problemi (ARP) literatüre ilk olarak 1959 yılında kazandırılmıştır. Yapılan çalışmada, belirli noktalardaki benzin istasyonlarına benzinin dağıtımını üzerinde durulmuştur. Depodan harekete başlayan ve yine bir depoya dönen, istasyonların ihtiyaçlarını bazı kısıtlar altında karşılayan ve taşıma

maliyetlerinin veya seyahat edilen yolun her bir dağıtım aracı için minimize edildiği rotalar kümesi belirlenmiştir (Dantzig ve Ramser 1959).

Araç rotalama probleminde her bir araç farklı rota olarak düşünülmektedir. Buna bağlı olarak hangi müşterinin hangi araç ile hizmet alacağı kararını rotalama, ilgili müşterinin atanmış olduğu rotada hangi sıra ile hizmet alacağı kararını ise çizelgeleme problemi olarak belirleyen çalışmalar da vardır.

En genel haliyle ARP; lojistik sisteminde bir veya birkaç depodan belirli müşterilere ürün dağıtımını yapan ve müşterilerden ürünlerin toplanmasını sağlayan bir sistemdir. Problemin, ürünleri depoya sevk eden veya taşıma hizmeti yapan araçların sayısı, araç kapasitesi, maksimum rota uzunluğu gibi bazı kısıtları bulunmaktadır. En kısa yol veya minimum maliyet gibi amaçlara dayanarak çözüm aranmaktadır.

Klasik ARP için çözüm, her rota başlangıcının depo olduğu ve son bulunduğu noktanın ise yine depo olduğu ve her müşteriye sadece bir kez uğrama kısıtının sağlandığı rotalar kümesidir. Bununla birlikte problemin türüne göre bazı yan kısıtların da eklenmesi gerekebilir. En çok yaygın olan yan kısıtlar; kapasite kısıtı, bir rotada olabilecek en fazla talep noktası kısıtı, bir rotadaki aracın ulaştığı toplam süre kısıtı, talep noktalarına hizmetin başlanabileceği ve bitebileceği zaman penceresi kısıtı, bir talep noktasının başka bir talep noktasından önce ziyaret edilmesinin gerektiği öncelik kısıtlarıdır (Laporte 1992).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde araç rotalama problemlerinin amaçları arasında şunlar bulunmaktadır;

- Seyahat mesafesi bakımından en kısa yoldan hedefe ulaşmak,
- Seyahat maliyetlerini minimize etmek,
- Sistem maliyetlerini ve sabit maliyetleri minimize etmek,
- Talebi karşılanamayan müşterileri için ceza maliyetini minimize etmek,
- Ulaşım süresini minimize etmek,
- Kullanılan araç sayısını minimize etmektir.

Klasik ARP'deki varsayımlar şu şekildedir;

- Müşteri talepleri bilinmektedir,

- Talepler tek bir merkezden veya depodan karşılanmaktadır,
- Müşteri noktalarına taleplerin dağıtımı yapılır,
- Araçlar aynı özelliktedir ve merkezde veya depoda hazır halde beklemektedir,
- Depo ile müşteriler arasındaki ulaşım süreleri veya mesafeleri sabittir ve bilinmektedir,
- Bir müşteriye sadece bir araç hizmet vermektedir,
- Araçların başlangıç ve bitiş noktaları depodur.

Araç rotalama problemleri, içinde barındırmış olduğu kısıtlara göre farklı türlere sahiptir ve NP-Zor problemlerdir. Problemi çözmek için gerekli olan hesaplama gücü kısıtların, amaç fonksiyonunun ve nokta sayısının boyutuyla birlikte üstel olarak artmaktadır.

Klasik ARP'ye ait matematiksel model aşağıda yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (2.8) ile araçların müşterileri ziyaret etmek için gideceği toplam mesafenin minimuma getirilmesi sağlanmaktadır. Kısıt (2.9), her müşterinin birer defa ziyaret edilmesini ve sonrasında araçların depoya dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.10), araçların depodan ve ziyaret edilen müşterilerden çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.11), müşterilere ulaşan rota sayısının, en fazla depodaki araç sayısı kadar olabileceğini ifade etmektedir. Kısıt (2.12), alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.13), depo ve müşterilerden oluşan bir düğümden başka bir düğüme gidilirken araçta taşınan toplam yükün müşterinin talebinin altında ve araç kapasitesinin üzerinde olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.14), iki düğüm arasında bağlantı varsa 1, aksi durumda 0 değerini alan karar değişkenini ifade etmektedir. Kısıt (2.15), alt tur oluşumunu önlemek için kullanılan karar değişkeninin negatif olmamasını sağlamaktadır.

İndisler ve notasyonlar

n : toplam düğüm sayısı (depo ve müşteriler)

V : depo ve müşteriler kümesi (1,2, ..., n)

N : müşteri kümesi (2,3, ..., n)

i, j : depo ve müşteriler (1,2, ..., n)

Parametreler

c_{ij} : i . düğüm ile j . düğüm arasındaki mesafe

M : büyük bir sayı

K : depoda bulunan araç sayısı

Q : depoda bulunan araç kapasitesi

q_i : i . müşteri talebi

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ düğüm} \text{ den } j. \text{ düğüme seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

$$u_i: i. \text{ düğüm ziyaret edilmeden önce araçtaki yük miktarı} \quad \forall i \in V$$

MATEMATİKSEL MODEL

Amac Fonksiyonu

$$\text{Enk } Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} * x_{ij} \quad (2.8)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (2.9)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} - \sum_{i \in V} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in V \quad (2.10)$$

$$\sum_{j \in N} x_{1j} \leq K \quad (2.11)$$

$$u_i - u_j + Q * x_{ij} \leq Q - q_j \quad \forall i, j \in N \quad (2.12)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (2.13)$$

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

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (2.15)$$

2.3 Araç Rotalama Probleminin Bileşenleri

ARP'nin temel bileşenlerini; talep yapısı, taşınacak malzemenin tipi, dağıtım/toplama noktaları ve araç filosu oluşturur (Eryavuz ve Gencer 2001). Bu bölümde, bahsi geçen bileşenler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.3.1 Talep Yapısı

ARP problemlerinde talep statik veya dinamik olabilir. Statik talep durumunda talep önceden bilinir. Dinamik durumda ise bazı noktalardaki talep bilinmekte bazıları ise araç rotasındaki seyahatine devam ederken ortaya çıkmaktadır (Savelsbergh ve Sol 1995).

Problem çözümünde genellikle talebin karşılanması amaçlanır. Kapasite kısıtı verilirken talep miktarları göz önünde bulundurulur. Kapasitenin yetersiz kalması durumunda sıklık ayarlaması yapılarak talep karşılanmaya çalışılır.

2.3.2 Malzeme Tipi

Farklı çeşitlerdeki malzemelerin taşınması söz konusu olabilmektedir. Gazete dağıtımı, çöp toplama, tehlikeli olabilecek maddeler, gıda ürünleri basit parçalar olarak adlandırılır ve probleme fazladan bir karmaşıklık eklemeyiz (Bowerman ve diğ. 1995).

Malzeme tipi, kullanılan araçları farklılaştırmaktadır. Araç kapasitesi ve araç hızı malzeme veya talep cinsine göre değişkenlik gösterebilmektedir. En çok kullanılan tipler lojistik ürünler ve yolcu taşımacılığını oluşturan insanlardır.

2.3.3 Dağıtım/Toplama Noktaları

Birçok ARP'de, dağıtım noktaları müşterilerin bulunduğu noktalar, toplama düğümleri ise depolardır. Tüketim mallarının fabrikalardan dağıtım noktalarına taşınması buna örnek olarak gösterilebilir (Eryavuz ve Gencer 2001).

Bir noktaya uğrayacak araç sayısı bir olmalı ve kapasite kısıtı altında o noktadaki talebi karşılayabilmelidir. Birden fazla dağıtım (depo) noktası olması durumunda bu noktalara ait araçlar ilgili depoya atanmış rota üzerindeki müşterilere hizmet sağlamaktadır.

2.3.4 Araç Filosu

Bütün ARP'lerde araçların kapasitesinin bilindiği ve çoğunlukla araçların homojen yani aynı kapasitede olduğu varsayılmaktadır. Araç filosunun heterojen olması durumunda ise araçların taşıma kapasiteleri farklılık göstermektedir. Bu durum hangi araç tipinin, hangi rotaya hizmet vereceğinin belirlenmesi ilave bir kararı gerektirmektedir. Araçların diğer özellikleri arasında hız, yakıt tüketimi, taşınacak malzemeye uygunluğu sayılabilir. Bu özelliklerin rotalama kararlarına doğrudan etkisi yoktur (Eryavuz ve Gencer 2001).

Araç kapasitelerinin heterojen olması durumunda; noktalara dağıtım yapılacak rotanın nasıl olacağı bulunurken hem hizmet verecek araç sayısı hem de araçların kapasitesi göz önünde bulundurulur. Ayrıca çözüm bulunurken hizmet noktasının talebi de büyük rol oynamaktadır. Çünkü dağıtım yapacak aracın rotadaki noktalara dağıtacağı ürünlerden sonra araçta kalacak boş kapasite göz önünde bulundurulur ve fazla araç hizmete almaktansa boş kalan bu kapasitenin kullanım durumu ortaya çıkar.

Agrawal ve diğ. (2016) tarafından geçen süreyi en aza indiren, en az sayıda rota ile işleri tamamlamak amacıyla çalışma yapılmıştır. Çalışma, iki ölçütlü genetik algoritma (GA) kullanılarak gerçek zamanlı ARP problemini içermektedir. Heterojen taşıtlarla, birden fazla depodan hizmet sağlanmaktadır. Her bir konumun teslim alma ve teslim etme süresi birbirinden farklı olan problemin çözümleri araştırılmıştır.

2.4 Araç Rotalama Probleminin Lojistikteki Yeri ve Kullanım Alanları

Literatüre ilk kazandırılan çalışmanın yapıldığı 1959 yılından itibaren araç rotalama problemi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan ilk çalışmalara bakıldığında, maliyet avantajının sağlanması ve zamandan tasarruf amacıyla malzeme ve ürün dağıtım/toplama işlemleri üzerine daha fazla yoğunlaşma olduğu görülmektedir. Daha sonralarda ihtiyaçların artması ve yeni ihtiyaçların ortaya çıkması ile birlikte ARP alanında yapılan çalışmalar farklı alanlara yayılmıştır. Ulaşım alanında genişleyen araştırmalar ile birlikte insanların bir yerden başka bir yere taşınması üzerine yapılan çalışmaların arttığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmalar maliyet kalemlerinin düşürülmesinin yanında hizmet kullanıcıların da daha kaliteli ve uygun hizmeti sağlamayı da amaçlamaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte bu çalışmalar yaşamı kolaylaştırıcı uygulamalara yol gösterici nitelikte olmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalara göre araç rotalama probleminin en çok uygulandığı alanlar şu şekilde sıralanabilir (Keskintürk ve diğ. 2015);

- Atık toplama,
- Ürünlerin bir veya daha fazla depodan farklı müşteri noktalarına dağıtımını (ulaşım ve lojistik sektöründeki uygulamalar),
- Dağıtım ve toplama problemleri,
- Okul taşıt güzergâhlarının belirlenmesi,
- Uçak rotalama problemleri,
- İnternet üzerinden yapılan alışverişlerin teslimatı,
- Gazete, posta, ekmek, içecek vs. dağıtımını,
- Devriye araçlarının rotalanması,
- Stok alanındaki malzeme toplama problemleri,
- Engelli insanların taşınması,
- Servis araçlarının rotalanması.

2.5 Araç Rotalama Problemi Türleri

Kullanmış olduğumuz taşıtlar hayatımızı ulaşım ve malzeme taşımacılığında kolaylaştırmaktadırlar. İnsanlar tarafından bir yerden bir yere kolay ve hızlı şekilde ulaşmak hedeflenmektedir. Günümüzde bu ihtiyaçların karşılanması amacıyla ulaşım araçları tasarlanmıştır. Araç rotalama problemleri de ihtiyaçlarımızı optimum kaynak kullanarak karşılayabilmemiz için bize yeni çözüm yolları sunmaktadır. Araçların farklı kullanım alanlarına yayılması ile birlikte problemin genişliği artmış ve yeni çözüm yolları aranmaya başlanmıştır. Yukarıda belirtilen araç rotalama probleminin kullanım alanları ise bu ihtiyaçlar dahilinde ortaya çıkmıştır.

Farklı hizmet alanlarının ortaya çıkmasıyla birlikte ARP, tüm problemlerin çözümünde yetersiz kalmış ve yeni çözüm yolları bulma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte ihtiyacı karşılamayı hedefleyen çalışmalar literatürde yapılmaya başlanmış ve araç rotalama probleminin daha özelleşmiş çeşitleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bir ARP çözümünde kısıtlara ve gerçek hayatta karşılaşılan durumlara göre model geliştirmeleri yapılmaktadır. Bu da ARP'nin, gerçek hayatta karşılaşılan ve çözüm aranan probleme gerçeğe daha yakın çözümler bulmasına yardım etmektedir.

Literatürde ele alınmış olan araç rotalama türlerini şu şekilde sıralayabiliriz;

- Klasik ARP
- Heterojen Filolu ARP
- Açık Uçlu ARP
- Heterojen Filolu Açık Uçlu ARP
- Zaman Pencereci ARP
- Önce Dağıt Sonra Topla ARP
- Eş Zamanlı Topla-Dağıt ARP
- Mesafe Kısıtlı ARP
- Dinamik ARP
- Stokastik ARP
- Çok Depolu ARP
- Bölünebilir Talepli ARP

- Kapasite Kısıtlı ARP

Besleyici Otobüs Ağ Tasarım çalışmasında; birden fazla istasyon duraklarından otobüs duraklarına ulaşan bir otobüs ağı tasarlamak amaçlanmaktadır. Bu problemin geliştirilmesinde yol gösterici nitelikte olan ARP türleri üzerinde durulacak ve tanımlamaları yapılacaktır.

2.5.1 Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi ilk olarak Sariklis ve Powell (2000) tarafından tanıtılmıştır. Araçların depoya geri dönmesi gerekmeyen ARP'nin bir çeşididir. Araçlar depoya geri dönmeleri gereken durumlarda, depodan gelirken kullandıkları yolu izlerler, ancak bu kez müşterileri ters sırada ziyaret ederler (Sariklis ve Powell 2000). Taşıtların depoya geri gönderilmesi zorunlu olmadığından, üçüncü taraf lojistik sağlayıcısına teslimat yapan şirketler gibi uygulamalarda karşılaşılmaktadır (Erbao ve Mingyong 2010). Bu, A_ARP'deki rotaların depoda çıkan ve rotaların Hamilton çevrimi olduğu ve ARP'nin aksine müşterilerden birinde sonlanan Hamilton yollarından oluştuğunu ima etmektedir. Başka bir deyişle, sabit bir kaynak düğümü olan en kısa Hamilton yolu A_ARP'deki her araç için çözümlenmelidir. En kısa yolun NP-Zor problem olduğu bilinmektedir; çünkü Hamilton yolu, NP-Zor olduğu bilinen seyahat eden satış elemanı probleminin bir örneğine dönüştürülebilir (Fleszar ve diğ. 2009).

A_ARP, araçların depoya geri dönmek zorunda kalmayacağı bir araç filosuna sahip birçok müşteriye hizmet vermeyi amaçlayan bir kombinasyon optimizasyon problemidir (Erbao ve Mingyong 2010). Tipik bir A_ARP'de, Q birimi kapasitesine ve homojen araçlara sahip bir başlangıç deposu vardır. Her bir rota, depodan başlayan ve malların teslim edildiği müşterilerden birinde biten bir müşteri dizisidir veya her rota, belirli bir müşteriden başlayan ve malların bulunduğu dağıtım deposunda biten bir müşteri dizisidir. Her müşteri bir araçla tam olarak bir kez ziyaret edilirken, araç etkinliği kapasite kısıtlamaları ile sınırlandırılmıştır. Amaç, belirli sayıda müşteriye ürünleri sunan bir araç filosunun toplam nakliye maliyetini en aza indirmektir (Erbao ve diğ. 2014).

Amaç fonksiyonu (2.16) toplam seyahat eden araç mesafelerini (maliyetleri) en aza indirmektedir. Kısıt (2.17) ve (2.18) tek bir aracın her müşteriye girip çıkmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.19), her bir müşterinin tam olarak bir araç tarafından ziyaret edilmesini sağlamaktadır (servis bölünemez). Kısıt (2.20) toplam k adet aracın depodan çıkmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.21) araçların kapasite kısıtıdır. Hizmet verilen noktalardaki taleplerin araç kapasitesini aşmaması beklenmektedir. Kısıt (2.22) karar değişkenlerinin alabilecekleri değerleri tanımlamaktadır.

Erbao ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmalarında belirtilen matematiksel model;

İndisler ve notasyonlar

k : araçlar (1,2, ..., K)

N : müşteri kümesi (1,2,3, ..., n)

K : araç kümesi (1,2,3, ..., k)

i, j : müşteriler (1,2, ..., n)

Parametreler

c_{ij} : i . düğüm ile j . düğüm arasındaki mesafe

Q : depoda bulunan araç kapasitesi

q_i : i . müşteri talebi

Karar Değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i. \text{ düğüm} \text{ den } j. \text{ düğüme } k \text{ aracı ile seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ müşteri} \text{ si } k \text{ aracı ile hizmet aldı ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

u_i : i . düğümü terk eden aracın yük üst limiti

MATEMATİKSEL MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$Enk Z = \sum_{k=1}^k \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} * x_{ijk} \quad (2.16)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.17)$$

$$\sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.18)$$

$$\sum_{k=1}^k y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.19)$$

$$\sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^n y_{0ik} = k \quad \forall k \in K \quad (2.20)$$

$$u_j - u_i + Q * (1 - x_{ijk}) \geq q_j \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (2.21)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (2.22)$$

2.5.2 Çok Depolu Araç Rotalama Problemi

Bir işletme, müşterilerine hizmet sunarken birden çok depoya sahip olabilir. ÇD_ ARP için müşterilerin depolara atanması gerekmektedir. Her depoya bir araç filosu verilir. Her araç bir depodan başlar, o depoya atanan müşterileri ziyaret eder ve aynı depoya geri döner. ÇD_ ARP'nin amacı seyahat mesafesini ve araç sayısını minimize etmektir. Çözüm, her rota standart ARP kısıtlarını karşıladığında ve rotanın bir depodan başlayıp yine aynı depoda bitmesi durumunda uygun olmaktadır.

Mevcutta sadece tek depodan bir dağıtım sistemini yürütme ihtimali zayıf olmasına rağmen birden fazla deponun bulunduğu ÇD_ ARP için yayınlanmış çalışmalar azdır. ÇD_ ARP çözümünde yaygın olarak kullanılan teknik, iki aşamalı bir yaklaşımdır. İlk olarak müşteriler kendileri için en yakın olan depoya atanır ve her depo için ARP çözülmektedir (Salhi ve Sari 1997).

ÇD_ ARP problemlerinin çözüm zorluğuna karşın, önce grupla sonra rotala tipindeki iki aşamalı metod, küçük boyutlardaki problemler için uygun sonuçlar bulabilmektedir. ÇD_ ARP için toplam çözüm maliyeti ilk aşamada kullanılan atama algoritmasına kuvvetli şekilde bağlıdır ve bu algoritmalar çözülecek problem

örneğinin coğrafi uygunluğuna dayanmaktadır. ÇD_ARP'de müşterilere birçok depodan biri tarafından hizmet verilmelidir. ARP'deki gibi her araç ayrıldığı depoya geri dönmelidir (Tansini ve diğ. 2000).

ÇD_ARP'ye ait matematiksel model aşağıda belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu (2.23), müşterileri taleplerine cevap vermek üzere ziyaret edip depolardan yola çıkan araçların seyahatini gerçekleştireceği toplam mesafenin en küçüklenmesini ifade etmektedir. Kısıt (2.24), her bir müşterinin bir araç ile bir defa ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.25), ziyaret edilen müşteriden ziyaretini tamamlayan aracın çıkış yapmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.26), depoda bulunan araçların gerek duyulması durumunda kullanılmasını ve ihtiyaç yoksa kullanılmamasını sağlamaktadır. Kısıt (2.27), müşterilere hizmet vermesi için kullanılan araçların aynı depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.28), müşteri taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.29), iki nokta arasında seyahat eden bir araçtaki yük miktarının araç kapasitesini aşmamasını ifade etmektedir. Kısıt (2.30), alt tur oluşumunu önlemektedir. Kısıt (2.31), depolar arası geçişe izin verilmemesini sağlamaktadır. Kısıt (2.32), iki düğüm arasında bağlantı olup olmadığını gösteren karar değişkeninin alabileceği değerler kümesini göstermektedir. Kısıt (2.33), iki düğüm arasında seyahat eden araçtaki yük miktarını gösteren karar değişkeninin pozitif olması gerektiğini ifade etmektedir.

İndisler ve notasyonlar

I : müşteri sayısı

J : depo sayısı

i, j : müşteriler $(1, 2, \dots, J + I)$

D : depolar kümesi $(1, \dots, J)$

N : müşteriler kümesi $(j + 1, \dots, J + I)$

V : ana depo ve müşteri kümesi $(1, \dots, J + I)$

K : hizmet veren araçlar kümesi $(1, \dots, K)$

Parametreler

c_{ij} : i . şehir ile j . şehir arasındaki mesafe

Q : araçların kapasitesi

q_i : i . müşteri talebi

Karar Değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i. \text{ şehirden } j. \text{ şehire } k \text{ aracı ile seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

u_{ij} : i 'den j 'ye giderken araçtaki dağıtılacak toplam yük miktarı $\forall i, j \in V$

MATEMATİKSEL MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} * x_{ijk} \quad (2.23)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.24)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} - \sum_{i \in V} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in V \quad (2.25)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.26)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in N} x_{jik} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.27)$$

$$\sum_{i \in V} u_{ij} - \sum_{i \in V} u_{ji} = q_i \quad \forall j \in N \quad (2.28)$$

$$u_{ij} \leq Q * \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad \forall i, j \in V \quad (2.29)$$

$$x_{iik} = 0 \quad \forall i \in V, k \in K \quad (2.30)$$

$$x_{ijk} = 0 \quad \forall i, j \in D, k \in K \quad (2.31)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (2.32)$$

$$u_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in V \quad (2.33)$$

Bu problem, kısıtlarıyla birlikte düşünülduğünde A_ARP'nin birden fazla depo veya dağıtım noktasından rotalar oluşturduğu durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.5.3 Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

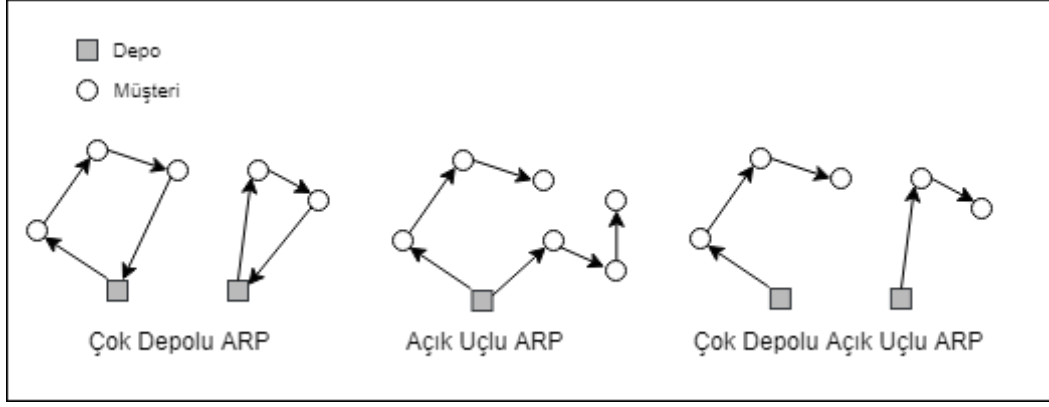
A_ARP açısından çoğu araştırmacı, tüm araçların aynı merkezi depodan başladığını ve bir müşteri düğümünde sona erdiğini varsaymaktadır. Ancak, birçok gerçek hayat taşımacılığı, lojistik ve tedarik zinciri uygulamasında, şirketler genellikle büyük bir araçlar kullanmakta ve birden fazla depoya çalışmaktadırlar. Bu problem, tek depoya sahip A_ARP'den çok daha karmaşıktır ve Çok Depolu Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi olarak adlandırılabilir. Ayrıca tek depo A_ARP, ÇDA_ARP'nin özel bir durumu olarak görülebilir (Liu ve diğ. 2012).

ÇDA_ARP ayrıca, temel ARP'nin bir başka varyantına, yani ÇD_ARP benzemektedir. Bu problemde de birden fazla depo vardır fakat hizmet sağlayan araçlar müşteri noktalarına uğradıktan sonra tekrar depolara dönmektedirler.

A_ARP'de, araçlar rotanın sonundaki son müşteriyi ziyaret ettikten sonra depo noktasına dönmeler. A_ARP üzerindeki her bir rota, ziyaret edilen müşterilerden oluşur ve son noktası da bir müşteri noktasıdır. Ayrıca, bütün müşterilere servis yapmak için ihtiyaç duyulan en az araç sayısı da bulunmaktadır (Li ve diğ. 2007).

Tek depolu A_ARP'nin gerçek anlamda NP-Zor olduğu bilindiğinden (Brandao 2004), ÇDA_ARP'nin de NP-Zor olduğu söylenebilir. Tarantilis ve Kiranoudis (2002), A_ARP ve ÇD_ARP üzerine yaptıkları çalışmayla yeni bir meta-sezgisel sunmaktadırlar.

ÇD_ARP, A_ARP ve ÇDA_ARP kapsamında depolardan müşterilere ürün dağıtımını Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Farklı çeşit ARP'ler için müşteri-depo bağlantıları

A_arp ile ilgili olarak literatürde şu şekilde çalışmalar yapılmıştır;

Sariklis ve Powell (2000) tarafından maliyet kaybını en küçükleme için sezgisel bir yöntem sunulmaktadır. Yöntemin performansı; müşteri sayısı, araç kapasitesi ve ceza stratejisi açısından test edilmiştir.

Yu ve diğ. (2011), kömür madeni malzeme taşıma araçlarını yönlendirmek amacıyla A_arp'nin çözümü için tabu arama algoritması ve genetik algoritmanın optimizasyonunu sağlayacak bir yöntem kullanarak ekonomik taşıma maliyetlerini gözlemlemişlerdir.

Fu ve diğ. (2005) tarafından belirli taleplere sahip müşteriler ve deponun bulunduğu bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada müşteriler talepleri kadar hizmet alacak ve aynı zamanda araç kapasitesi göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm müşterilere hizmet verecek şekilde kullanılacak olan maksimum araç sayısı ve toplam seyahat maliyetini tabu arama algoritması kullanarak en aza indiren güzergahın belirlenmesini içeren bir çalışmadır.

Li ve diğ. (2007) tarafından A_arp'yi çözen 11 algoritmanın sonuçlarını karşılaştırmış ve uyarlanabilir büyük komşuluk arama, rekor-kayıt seyahat ve tabu arama algoritmalarına dayanan prosedürlerin iyi sonuç verdiğini görülmüştür.

Repoussis ve diğ. (2010), hibrit bir strateji geliştirmişler ve problemi aşamalar halinde A_arp'yi çözmeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada yerel arama ve tabu arama metotlarından da faydalanmışlardır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Christofides ve diğ. (1981) tarafından müşterilere bilinen talepleri karşılamak için kat edilen toplam mesafeyi en aza indirecek şekilde merkezi bir tesise yerleştirilmiş ARP çözülmüştür. Problem, ARP olarak adlandırılmış olup birçok pratik uygulamaya sahip olan birden fazla gezgin satıcı probleminin bir genellemesidir. Algoritmalar problem azaltma ve baskınlık testlerini içermektedir. Hesaplamalar, literatürden elde edilen bir takım problemler ve bu problemlerin veri setleri için incelenmiştir. Sonuçlar, 25 müşteriye kadar olan araç rotalama problemlerinin tam olarak çözülebileceğini göstermektedir.

Laporte ve diğ. (1985) tarafından kapasite ve mesafe kısıtlamaları içeren araç rota problemleri için bir tam sayılı doğrusal programlama algoritması açıklanmaktadır. Metot, yeni bir alt tur eleme sınırlaması kullanmaktadır. Mesafe matrisinin doğasına bağlı olarak algoritmanın iki versiyonu sunulmuştur. Altmış şehri kapsayan problemler için kesin çözümler elde edilmiştir.

Laporte ve diğ. (1987) tarafından, asimetric mesafeyi kısıtlı ARP için çözecek bir algoritma geliştirmek üzerine bir çalışma yapılmıştır. Problem, alt problemlerin bazı kısıtlamaları dahil edilerek dal ve sınır algoritması aracılığıyla çözülmüştür. 100 düğüme kadar olan problemlerin hesaplamalı sonuçları rapor edilmiştir.

Hadjiconstantinou ve Christofides (1995) tarafından merkezi bir depoya yerleştirilmiş bir M özdeş araç filosunun, yalnızca araç kapasitesi kısıtlamalarına maruz kalan bilinen talepleri karşılamak için en uygun şekilde yönlendirileceği temel ARP'si çözülmektedir. Yapılan çalışmada, tüm rotaların ve en kısa yolun hesaplanmasına dayanmaktadır. Orjinal problemin iki yöntemin bir kombinasyonundan elde edilen alt sınırları kullanan ARP'yi çözmek için bir algoritma sunulmaktadır. Problemin boyutunu azaltmak ve sınırların kalitesini arttırmak için bu sınırların hesaplanmasından elde edilen bir dizi azaltma testi uygulanmaktadır. Elde edilen daha düşük sınırlar daha sonra problemi en iyi şekilde çözmek için bir ağaç arama prosedürüne gömülmektedir. Hesaplamalı sonuçlar,

literatürden alınan bir takım problemler için sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen yöntemin, yaklaşık 50 müşteriye kadar olan problemleri çözme ve yaklaşık 150 müşteriye kadar olan problemler için toleranslı sınırlar sağlamadaki etkinliğini göstermektedir.

Hansen ve Mladenovic (1997), P-medyan problemi, her biri en yakın tesisten tedarik edilen, müşterilerin talebini karşılamak ve toplam nakliye maliyetini en aza indirmek için tesisleri lokasyonlarında eşzamanlı olarak konumlandırmak amacıyla DKA yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar Tabu arama sezgiseli ile karşılaştırılmıştır.

Laporte ve diğ. (2000), çalışmaları ARP ile ilgili sezgisel arama yöntemini içermektedir. Klasik ve modern sezgisel arama olarak iki bölüme ayrılmıştır. İlk kısım, tasarruf yöntemi, tarama algoritması ve iki fazlı yaklaşımlar gibi iyi bilinen yöntemleri içermektedir. İkinci bölüm, en başarılı meta-sezgisel yaklaşımı olduğu kanıtlanan tabu araştırma çalışmasına ayrılmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Toth and Vigo (2002), çalışmalarında sadece araç kapasite kısıtlamalarının dikkate alındığı ARP'nin temel versiyonunun çözümü için son yıllarda önerilen Dal-Sınır yaklaşımını temel alan kesin algoritmaları gözden geçirmişlerdir. Bu algoritmalar, önceki yaklaşımlara göre çözülebilecek ARP'lerin boyutunu önemli ölçüde arttırmıştır. En azından maliyet matrisinin asimetric olduğu durumlarda, dal-sınır algoritmaları, kesin çözüme ilişkin olarak hala yüksek düzeyde kullanılmaktadır. Bir dizi örnek üzerinde farklı algoritmaların performansını karşılaştıran hesaplamalı sonuçlar sunulmuştur. Bu alanda gelecekteki olası araştırma yönlerini inceleyerek sonuca ulaşılmıştır.

Ralphs ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada, düzenli kapasiteye sahip sabit teslimat araçlarının tek bir ürün için bilinen müşteri talebini, ortak bir depodan minimum transfer maliyetiyle karşılaması gereken ARP'yi dikkate almıştır. Bu zorlu karışım problem, hem paketleme problemini hem de GSP'yi özel durumlar olarak içermekte ve kavramsal olarak bu iki iyi çalışılmış problemin kesişiminde yatmaktadır. GSP'nin alışveriş merkezi örneklerini etkin bir şekilde kapasite kısıtlamaları için ayrıştırma tabanlı bir metodoloji kullanılmıştır. Spesifik olarak, standart prosedürler bir aday noktasını ayırmadığında, onu GSP turlarının dışbükey

bir kombinasyonunda oluşturmaya çalışılmıştır. Başarılı olması durumunda, bu ayrıştırmada mevcut olan turlar ihlal edilen kapasite kısıtlamaları açısından incelenmektedir. Eğer başarılı değil ise, Farkas Teoremi, noktayı GSP bileşiminden ayıran bir hiper düzlem sağlamaktadır. Bu temel kavramın bazı uzantılarını ve içinde diğer kombinasyonlu modellere uygulanabileceği genel bir çerçeve sunulmuştur. Müşteri, kısa yol ve fiyat çerçevesi içindeki bir uygulama için sonuçlara ulaşılmıştır.

Baker ve Ayechev (2003) çalışmalarında, GA'nın, bilinen talebe sahip müşterilerin tek bir depodan tedarik edildiği temel ARP uygulamasını ele almaktadır. Araçlar ağırlık sınırına ve bazı durumlarda kat edilen mesafelere göre bazı kısıtlamalara tabidir. Her müşteriye sadece bir araç uğrayabilir. ARP'ler için bilinen en iyi sonuçlar, tabu arama veya benzetilmiş tavlama kullanılarak elde edilmiştir. GA'lar, özellikle zaman pencerelerinin dahil olduğu belirli ARP türleri de dahil olmak üzere çeşitli optimizasyon problemlerine yaygın bir uygulama olmaktadır. Ortaya konulan GA için hesaplama sonuçları verilmektedir. Çalışmada GA'nın geliştirilmiş modeli kullanılarak komşuluk arama yöntemleri ile daha fazla sonuç vermektedir. Bu yaklaşım, tabu arama ve benzetilmiş tavlama ile rekabet süresi ve kalitesi açısından rekabet ettiğini göstermektedir.

Bräysy (2003) tarafından, zaman pencereli ARP'yi çözmek için DKA yönteminin değiştirilerek yeni bir meta-sezgisel algoritma önerilmektedir. Sonuçlar iki gerçek yaşam problemi için rapor edilmiştir. Önerilen prosedür, yeni bir dört aşamalı yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşımda, araç sayısına ilişkin çözümleri geliştirmek için bir rota eleme prosedürü oluşturulmuştur. Önerilen model, çözümün diğer meta-sezgisel yöntemler ile rekabet ettiğini göstermektedir.

Bell ve McMullen (2004), yaptıkları araştırmada, bir ARP'ye karınca kolonisi optimizasyonu meta-sezgisel metodunu uygulamaktadır. Karınca kolonilerinin karar verme süreçlerini gıda için simüle edilmektedir. TA, BTA ve GA gibi diğer uyarlanabilir öğrenme ve yapay zeka tekniklerine benzemektedir. ARP'nin birden fazla yolunun aranmasına izin vermek için geleneksel GSP'yi çözmek için kullanılan karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasında değişiklikler yapılmıştır. Deney, algoritmanın bilinen en iyi çözümlerini bulmada başarılı olduğunu göstermektedir. Karınca kolonisinin kullanımının, özellikle daha büyük problemler için rekabetçi bir çözüm tekniği sağladığı gösterilmektedir. Ek olarak, algoritma içerisinde kullanılan

müşteri listelerinin büyüklüğü gelişmiş çözümler bulmakta önemli bir faktördür. Algoritma için hesaplama zamanları diğer çözüm yöntemleri ile karşılaştırılmaktadır.

Polacek ve diğ. (2004) tarafından, zaman pencereli ÇD_ARP'yi çözmek için DKA felsefesine dayanan bir algoritma önerilmiştir. Probleme yönelik bakış açısına göre hesaplama sonuçları, yaklaşımın hem çözüm kalitesi hem de hesaplama süreleri açısından mevcut bir TA algoritmasıyla rekabet ettiğini göstermektedir.

Fukasawa ve diğ. (2006), kapasite kısıtlı ARP için Dal-Sınır Algoritması ve Lagrange Gevşetmesi yöntemlerini kullanarak çözüme ulaşmışlardır. Yapılan çalışma, her iki yaklaşımı da birleştiren bir algoritma sunmaktadır. Biri talepleri karşılamaya yönelik Lagrange gevşemesiyle rotalar oluşturur. Dal-Sınır algoritması ise kapasite kısıtlamalarını ele alır. Geliştirilmiş olan model ise tanımlanan iki yöntemin kesişmesi üzerinde çalışmaktadır. Sonuç olarak elde edilen algoritma, literatürde bulunan en fazla 100 noktaya sahip tüm örnekleri çözebilir.

Kytöjokkia ve diğ. (2007), Yoğunlaştırılmış ARP için DKA sezgiseli kullanılmıştır. Amaç, coğrafi olarak dağınık müşterilere, bilinen taleplere göre hizmet vermek için aynı kapasiteye sahip araçlarla en düşük maliyetli yolları tasarlamaktır. Geliştirilen çözüm yöntemi özellikle büyük ölçekli gerçek yaşam ARP'leri çözmeyi amaçlamaktadır. Büyük ölçekli durum için hesaplanmış olan sonuçlar, önerilen yöntemin hızlı ve kaliteli çözümler üretme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Balcacci ve diğ. (2008), kapasite ve takım eşitsizliklerine karşılık gelen ek parçalar ile ayarlanmış bölümlenme formülasyonuna dayanan kapasite kısıtlı ARP için yeni bir algoritma sunmuştur. Algoritma, üç sezgisel yöntemi birleştirerek ortaya çıkan matematiksel formülasyon ile çözüm sağlayan bir bağlama prosedürü kullanmaktadır. İlk sezgisel tarama, ARP'nin belirlenmiş bölümlenme formülasyonunun alternatif rotalar oluşturmaya dayanmaktadır. İkincisi, Lagrange gevşemesi, rota parçalarının oluşturulmasını ve bunların fiyatlandırmasını sağlamaktadır. Üçüncüsü, klasik bir fiyatlandırma ve parça üretimi ile ilk iki prosedürün bıraktığı boşluğu kapatmaya çalışmaktadır. İlk çözüm, yalnızca düşük maliyetleri bir üst sınır arasındaki boşluğun altındaki rotaları içeren azaltılmış bir problem üretmek için kullanılmaktadır ve alt sınır elde etmektedir. Ortaya çıkan

problem bir tam sayı programlama çözücüsü ile çözülmektedir. Literatürden elde edilen ana örnekler üzerindeki hesaplama sonuçları, önerilen algoritmanın etkinliğini göstermektedir.

Doerner ve diğ. (2008), bozulabilen ürünlerin toplanması için zaman pencerelerinin, çözüm sürecinde kullanılan dağıtım politikasına bağlı olduğu yeni bir ARP'ye bir model ve birkaç çözüm prosedürü sunmaktadır. Birbirine bağlı zaman penceresini içeren ARP'ye, lojistik departmanlarına yardımcı olmak için Avusturya Kızılhaç kan programı ile yürütülen bir proje ile çalışılmıştır. Bu problem için bir birime dayalı işlem prosedürünün yanı sıra dal ve sınır tabanlı bir algoritma geliştirilmiş ve uygulaması yapılmıştır. Teorikte mevcut prosedürlerle karşılaştırıldığında maliyetlerde beklenen düşüşü bulmanın yanı sıra bulgular, sezgisel algoritmaların çözümlerinin optimum seviyeye oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Araç sayısının teorikteki minimum araç sayısının artırılmasının bir diğer önemi de, maliyet düşürmek için daha fazla potansiyel yaratmasıdır.

Fleszar ve diğ (2009), A_ARP'de amaç, araç sayısını en aza indirmek ve sonra kat edilen toplam mesafeyi (veya süreyi) en aza indirmektir. Her rota depoda başlar ve bir müşteride sona ermektedir. Her seferinde depoya geri dönmeden bir kaç müşteriyi ziyaret etmektedir. Her müşterinin talebi tamamen tek bir araç tarafından karşılanmaktadır. Her aracın hizmet verdiği toplam talep, araç kapasitesini aşmamalıdır. Ek olarak, problemin bir varyantında, her bir aracın sürüş süresi bir üst sınırı geçmemelidir. Bu problem için DKA çalışması önerilmiştir. Mahalleler, rotaların (alt yollar) ters kısımlarına ve rotalar arasındaki değiş tokuş bölgelerine bağlanmaktadır. On altı standart kıyaslama problemi örneğindeki hesaplamalı sonuçlar, önerilen DKA'nın çözüm kalitesi bakımından yayınlanan en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Hemmelmayr ve diğ. (2009), Periyodik ARP ve GSP için mevcut metotlardan daha rekabetçi hatta daha iyi performans gösteren DKA algoritması önerilmiştir. Her iki problem sınıfına da aynı temel algoritmayı uygulayarak karşılaştırma yapılmıştır. Bununla birlikte, kapsamlı bir sayısal analizle elde edilen sonuçlar, algoritmanın bu problem sınıflarına uygulanan diğer yaklaşımlarla rekabet ettiğini göstermiştir.

Xu ve diğ. (2012) tarafından, zaman pencereli ÇDH_ ARP'nin matematiksel modeli oluşturulmuş ve problem çözümü için değiştirilmiş bir DKA algoritması önerilmiştir. Bilinen talepleri olan bir dizi müşteriye hizmet veren heterojen bir araç çemberi için her biri depoda başlayıp depoda son bulan bir araç güzergahı tasarlamayı içermektedir. Önerilen algoritmanın performansı, literatürde yapılan çalışma örnekleri üzerinde test edilmiş ve sonuçlar önerilen algoritmanın zaman pencereli ÇDH_ ARP'yi çözümede rekabetçi ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Brito ve diğ. (2013) tarafından, zaman pencereli kapalı-açık ARP için bir çalışma yapılmıştır. Şirketin kendine ait araçları bulunmaktadır ve belirli hizmet ihtiyaçları veya iş stratejisi için tamamlayıcı kaynaklar sağlayan diğer şirketlerin hizmetlerini kiralamaktadırlar. Yapılan çalışma DKA meta-sezgiselinin farklı komşuluklarla kapalı-açık ARP için en uygun çözümleri aramakta ve analiz yapmaktadır. Çalışma sonucunda ise pratik rota planlama sorunlarına çözüm bulmak için DKA'nın etkili bir yöntem olduğuna ulaşılmıştır.

Oturakçı ve Uyan (2014), bir lojistik firmasının ARP'sini ele almışlardır. Çalışmanın içeriğinde, yönetim maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturan dağıtım işlemlerinin optimizasyonu ile ilgili araç rotasyon prosedürü uygulanmıştır. Çözüm için uygun bir programlama modeli sunulmuş ve GAMS programı yardımıyla bir rota planı oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, taşıtların sınırlandırılmasıyla ilgili olarak birden fazla müşterinin talebine göre dağıtım tek bir depodan yapılmaktadır. Dağıtım maliyetleri minimuma indirilmeye çalışılır. Her bir karşılanmamış talep birimi için ceza verilir. Şirketin bir dizi operasyon sınırlamasıyla ilgili olarak, asgari maliyetle hizmet verecek araç güzergahları belirlenmeye çalışılmaktadır. Çalışmada, maliyet azaltmanın yanı sıra her müşterinin talebi karşılamaya çalışılmaktadır. Cezai masrafların seçilmesiyle birlikte, karşılanamayan taleplerin miktarı en aza indirmeye çalışılır.

Alinaghian ve Shokouhi (2018) tarafından, araç sayısının en aza indirilmesini ve ardından toplam dolaşım yollarının en aza indirilmesini içeren çalışma yapılmıştır. Hibrit uyarlamalı komşuluk arama yöntemi kullanarak ÇD_ ARP üzerinden çözülmüştür. 10 müşteri, 2 tip ürün, 5 araç ve 1'den 4'e kadar olan depo sayısı faktörleri ile toplam seyahat mesafesi 4 durum için karşılaştırmalı olarak analiz

edilmiştir. Önerilen hibrit algoritmanın, tüm küçük boyutlu problemler için en uygun çözüme ulaştığı ortaya koyulmuştur.

Tarantilis ve Kiranoudis (2002) tarafından, Yunan endüstrisinin birçok depodan müşterilere taze et dağıttığı gerçek hayattaki büyük bir dağıtım problemi incelenmiştir. Problem, ÇDA_ARP olarak formüle edilmiş ve bir meta-sezgisel ile çözülmüştür.

Norouzi ve diğ. (2009) tarafından, gerçek bir durumu inceleyen A_ARP için yeni bir iki amaçlı matematiksel model sunulmuştur. Amaç, rotaların seyahat maliyetlerini en aza indirmek ve rekabetçi bir durumda elde edilen satışları en üst seviyeye çıkarmaktır. Problemden, teslimatı tamamladıktan sonra mutlaka depoya geri dönmeyen bir araç filosu için bir rota seti tanımlamayı içermektedir. Makalede, sunulan matematiksel modeli ve ilgili sonuçları çözmek için küçük boyutlu test problemlerinde ÇAPSO yöntemi kullanılmaktadır. Çözüm setlerinin kalitesini değerlendirmek amacıyla çeşitli test örneklerinde birkaç sayısal araştırma karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu problem için önerilen ÇAPSO'nun verimliliğini ortaya çıkarmıştır.

Liu ve diğ. (2012) tarafından, ÇDA_ARP için araçların seyahat maliyetlerini en aza indiren rotaların belirlenmesi için yeni bir hibrit genetik algoritma sunulmuştur. Karma tam sayılı programlama matematiksel formülasyon ile etkin bir meta-sezgisel çözüm yaklaşımı verilmiştir.

Ramos ve diğ. (2013) tarafından, toplama rotalarının planlanması gereken dış kaynaklı bir araç filosuna sahip atık yağ toplama sisteminin gerçek yaşam problemi ile çalışılmıştır. Ele alınan rotalama problemi, tüm yolların bir depoda başlamasına izin vermekte ancak dikkate alınan amaç fonksiyonunu en aza indirmesine bağlı olarak aynı veya farklı bir yolla sona erebilmektedir. Bu problem, ÇD_ARP'nin kapalı ve açık rotalama karışımı olacak şekilde yapılmıştır. Çalışma, kapasite ve süre kısıtlamalarının dikkate alındığı karma tam sayılı doğrusal programlama formülasyonu ile modellenmiştir. Geliştirilen model, mevcut sonuçlar ile kıyaslandığında nihai sonuç olarak kilometrede %13 ve filo kiralama maliyetlerinde %11'lik bir düşüş elde edildiğini ortaya koymuşlardır.

Jia-li ve Zu-jun (2013) tarafından, bir şirketteki nakliye kapasitesinin yetersizliğini ve dağıtım merkezleri arasındaki nakliye kapasitesinin dengesizliğini çözmek için, ÇDA_ARP üzerine karma tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Toplam seyahat mesafesi, toplam maliyet ve teslimat araçlarının güzergahındaki sürenin minimum olacağı bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Problemin çözümü için hibrit genetik algoritma önerilmiştir. Model parametrelerinin duyarlılık analizi ve algoritmanın yakınsallık analizi yapılmış ve sonuçlar algoritmanın iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Zhang ve Wang (2013) tarafından, A_ARP için; çoklu depo, heterojen araç, yakıt tüketimi ve araçların başlangıç maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Problemin çözümü için GA kullanılmıştır. Genetik algoritmanın performansını iyileştirmek amacıyla ilk popülasyonu üretmek ve çaprazlamaya katılmak için bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Çözümler kaliteli sonuç vermiştir.

Pichka ve diğ. (2014) tarafından, Her depoda sınırlı sayıda araç dikkate alınarak yeni bir tam sayılı doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Rastgele üretilen küçük boyutlu problemler, önerilen modelin doğrulanması için çözülmüştür. Problemin karmaşıklığından dolayı, orta ve büyük ölçekli ÇD_ARP'lerin kıyaslamaları için BTA geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada geliştirilen matematiksel model, küçük boyutlu problemler için optimizasyon yazılımına kodlanmıştır. Küçük boyutlu problemler için uygulama sonuçları elde edilmiş ve optimizasyon yazılımı yardımıyla DSA ile belirlenen optimum çözümler karşılaştırılmıştır. Müşteri sayısı 4, 6 ve 8 olan, depo sayısı 1, 2, 3 ve 4 olan ve her depoda 1 veya 2 araç olacak şekilde testler yapılmıştır. Büyük modelde 14 test problemi üretilmiş ve iki modelin sonuçları karşılaştırılmıştır. ÇDA_ARP için mevcut kıyaslama testi örnekleri, önerilen meta-sezgisel taramalarını doğrulamak ve sonuçları literatürde sunulan diğer algoritmalarla karşılaştırarak analiz etmek için kullanılmıştır.

Lalla-Ruiz ve diğ. (2015) tarafından, literatürde yapılan bazı kısıtlamaları geliştirip yenilerini önererek yeni bir karma tam sayılı programlama formülasyonu önerilmiştir. Literatürden problemlerli örnekler üzerinden yapılan hesaplamalı çalışmalar, önerilen modelin yüksek performanslı çalıştığını göstermektedir. 3 depodan ve 29 müşteriden oluşan bir problem için yapılan analiz, hesaplama hızını

azaltıp, optimal çözümün daha önce bilinmediği durumlar için daha iyi çözümler elde ettiğini göstermiştir.

Yu ve diğ. (2016) tarafından, homojen kapasiteli taşıtlar, toplama işlemlerine farklı noktalarda ve zamanlarında başlamıştır. Tek ürünlü çalışmada araçlar aynı anda çapraz yükleme merkezine varmak için ağda senkronize olarak yönlendirilmek üzere programlanmıştır. Teslim işlemlerinde, tüm müşterilere en fazla bir defa servis yapılmakta ve teslimatlar önceden belirlenmiş bir sürede tamamlanmaktadır. Araç kiralama maliyeti ve nakliye maliyeti toplamını en aza indirmeyi hedefleyen ÇDA_ ARP çalışması BTA ile çözülmüştür. Üç problem seti için makul bir süre içinde iyi çözümler sunan çalışma literatürdeki ARP'ler için de test edilmiştir.

Soto ve diğ. (2017) tarafından, ÇDA_ ARP, Tabu Arama ve DKA hibritleşmiş algoritması geliştirilerek çözülmüştür. Çalışmada, A_ ARP ve ÇDA_ ARP için literatürün ana örnekleri üzerinde testler yapılmıştır. İstatistiksel testlerden, A_ ARP ve ÇDA_ ARP için modern zaman yöntemlerinden hesaplama süresi bakımından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Azadeh ve Farrokhi-Asl (2017) tarafından, mamullerin depolardan önceden belirlenmiş müşterilere dağıtılması ve atıkların toplanması için ÇD_ ARP ve kapasite kısıtlı ARP üzerine çalışma yapılmıştır. Problemin çözümünde amaç fonksiyonu, müşterilere verilen hizmetin toplam maliyetini en aza indirmektir. Problemi etkili bir şekilde ele almak için yeni bir karma tam sayılı programlama modeli ve yeni bir karma meta-sezgisel önerilmektedir. Çalışmada, ilk bağlantının yapımında en yakın komşuluk ve AHP yöntemleri kullanılmış ve çözümleri geliştirmek için yinelemeli takas prosedürü sezgisel algoritması kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar önerilen karma genetik algoritmanın büyük ölçekli problemlerde etkinliğini kanıtlamıştır.

Sánchez-Oro ve diğ. (2017) tarafından, ÇDA_ ARP'de verimli kümeye yaklaşmak için DKA algoritmasını kullanarak toplam rota sayısını, toplam seyahat maliyetini ve en uzun rotayı en aza indiren çözümler aramışlardır.

Toro ve diğ. (2017) tarafından, Bir başka çalışmada, Yeşil A_ ARP adlı, artan yakıt tüketimini azaltma ihtiyacının yanı sıra literatürde yakın zamanda sunulan A_ ARP'yi birleştiren yeni bir iki amaçlı ARP ortaya konmuştur. ÇDA_ ARP, bir dizi

aday konumdan bir veya daha fazla deponun seçilmesini ve seçilen depolardan bir müşteriye teslimat rotalarının planlanmasını içeren stratejik düzeyde bir problemdir. Radyal yollar kavramı, bağlantıları ve kapasite gerekliliklerini önemli ölçüde basitleştiren bir dizi kısıtlama kullanmamızı sağlamaktadır. Makalede, çözüm yöntemlerinden çok modellemeye odaklanılmıştır. Önerilen model, işletme maliyetlerinin ve çevresel etkilerin en küçüklenmesini hedeflemektedir. Bununla birlikte, iki hedefli bir problem olarak formüle edilmiş ve çözülmüştür. Sonuçlar, önerilen modelin işletme maliyetleri ve çevresel etki arasındaki ilişki hakkında olumlu sonuçlara yol açan bir dizi çözüm üretebildiğini göstermektedir.

Şevkli ve diğ. (2017) tarafından, medya dağıtım şirketi için gazete dağıtım optimizasyon problemini toplam taşıyıcı maliyetini azaltarak çözmek amaçlanmıştır. Problem, araç rotalama probleminin bir çeşidi olan Çok Amaçlı A_ ARP olarak modellenmiştir. Problemi çözmek için DKA tabanlı algoritma önerilmiştir. Küçük ve büyük ölçekli gerçek dünya problem örnekleri ile test edilmiştir. Önerilen algoritma alternatif yöntemlere rekabetçi sonuçlar sunmuştur.

Shen ve diğ. (2018) tarafından, üçüncü parti lojistik şirketlerinin maliyetlerini düşürmek için çalışılan makalede düşük A_ ARP incelemektedir. Modelde amaç fonksiyonu, sürücünün maaş, ceza maliyetleri, yakıt maliyetleri ve karbon hareket işlem maliyetlerini içermektedir. Modeli ele almak için iki aşamalı bir algoritma önerilmiştir. İlk aşamada, başlangıçtaki yerel optimum PSO ile elde edilir. İkinci aşamada, TA ile global bir optimal çözüm elde edilmektedir. Deneyler, önerilen algoritmanın küçük ölçekli durumlar için daha uygun olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, farklı karbon fiyatları ve karbon kota değerleri ile bir dizi deney yapılmaktadır. Çalışmanın sonuçları, karbon ticaret fiyatları ve karbon kotaları değiştikçe toplam maliyetin etkilendiğini göstermektedir. Bu akademik sonuçlara dayanarak, çalışılan makale karbon ticareti politikalarının oluşturulması ve ayrıca lojistik firmalarının karbon emisyonu kısıtlamaları altında daha iyi rota planlamasına sahip olmaları için bazı etkili öneriler sunmaktadır.

Lahyani ve diğerleri (2019) tarafından, ÇDA_ ARP çözmek için bir hibrit metasezgisel ile birlikte komşuluk arama algoritması kullanılmıştır. Çalışma, seyahat maliyetini en aza indirmek için atama ve yönlendirme kararlarını birleştirmektedir. 48 müşteri için tekli depo versiyonu durumunda 6 depo ve 288 müşteri için detaylı

bir analiz yapılarak, metasezgiselin hangi bileşenin çözüm kalitesine daha fazla katkı sağladığını ortaya koyan bir çalışma yapılmıştır.

Liu ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada, düğümler kümesi seti için $V = N \cup D$ olmaktadır. $N = 1, 2, \dots, n$ hizmet verilecek müşterileri temsil etmektedir. $D = 1, 2, \dots, m$ ise depoları temsil etmektedir. Her bir i, j düğümü arası seyahat maliyeti c_{ij} olarak tanımlanır. Aynı Q miktar kapasiteye sahip sınırsız sayıda araç vardır. Her müşteri q_i ile tanımlanan kendine özgü talep miktarına sahiptir. Her deponun talep miktarı 0 (sıfır) olduğu kabul edilir. Seyahat mesafesi her bir araç rotası için H miktarını aşamaz. Müşteri noktalarından depo noktalarına olan uzaklıklar 0 (sıfır) olarak alınır. Kısaca, $c_{ij} = 0, \forall i \in N, i \in D$ olmaktadır. Burada, durak noktasından istasyon noktasına bir bağlantı olmuş ise bu noktanın geçerliliğini pasif hale getirmek amacıyla duraktan istasyona olan mesafe 0 olarak alınır. Dolayısıyla duraktan istasyona bir bağlantı olmuşsa bile amaç fonksiyonunda maliyete bir etkisi olmayacaktır.

Liu ve diğ. (2014) tarafından çalışılmış ÇDA_ARNP modeli aşağıda verilmiştir;

İndisler ve notasyonlar

D : depo kümesi (1,2, ..., m)

N : müşteri kümesi (1,2,3, ..., n)

i, j : depolar ve müşteriler (1,2, ..., n + m)

k : depolar (1,2, ..., m)

Parametreler

c_{ij} : i . düğüm ile j . düğüm arasındaki mesafe

H : maksimum rota uzunluğu

Q : depoda bulunan araç kapasitesi

q_i : i . müşteri talebi

Karar Değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{ araç } k \text{ deposundan başlayıp } i. \text{ düğüm} \text{ den } j. \text{ düğüme seyahat etti ise} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$u_i: i. \text{ düğümü terk eden aracın yük üst limiti} \quad \forall i \in V$$

$$h_i: i. \text{ düğümü terk eden aracın hareket mesafesi üst limiti} \quad \forall i \in V$$

MATEMATİKSEL MODEL

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enk } Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in D} c_{ij} * x_{ijk} \quad (3.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in D} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = \sum_{i \in V} x_{jik} \quad \forall j \in V, k \in D \quad (3.3)$$

$$u_i - u_j + Q * x_{ijk} \leq Q - q_j \quad \forall i \in N, k \in D, j \in V \setminus k \quad (3.4)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (3.5)$$

$$u_k = 0 \quad \forall k \in D \quad (3.6)$$

$$h_i - h_j + H * x_{ijk} \leq H - c_{ij} * x_{ijk} \quad \forall i \in N, k \in D, j \in N \setminus k \quad (3.7)$$

$$0 \leq h_i \leq H \quad \forall i \in N \quad (3.8)$$

$$h_k = 0 \quad \forall k \in D \quad (3.9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, k \in D, i \neq j \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.1), amaç fonksiyonu olup toplam seyahat mesafesini en küçüklemeyi hedeflemektedir. Kısıt (3.2), her bir müşteri düğümüne bir kez hizmet verilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.3), her bir müşteri ve depo düğümü arasında denge kurulmasını sağlamaktadır. Bir rotaya giren otobüs noktası aynı noktayı terk etmelidir. Kısıt (3.4), (3.5) ve (3.6) alt tur ve özel turların oluşmasını engellemeyi sağlamaktadır. Kısıt (3.7), (3.8) ve (3.9) birbirine bağlanan noktaların hareket mesafeni kontrol etmekte ve rota uzunluğu dengesi kurmaktadır. Kısıt (3.10), bütünlük kısıtlamasıdır.

Yukarıda belirtilen matematiksel model kullanılarak GAMS programında kodlama yapılmıştır. Cordeau ve diğ. (1997) tarafından bulunan TA sonuçları, Baldacci ve Mingozzi (2008) tarafından geliştirilen metot ile elde edilen sonuçlar ve Liu ve diğ. (2014) tarafından geliştirilen ÇDA_ ARP modelinde; bu veriler kullanarak elde ettikleri sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak, literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan Cordeau ve diğ. (1997)'nin önerdiği ÇD_ ARP kıyaslama örneklerini temel alan ÇDA_ ARP test örnekleri kullanılmıştır. Kısaca, ÇD_ ARP kıyaslama örneklerindeki çoğu bilgi doğrudan ÇDA_ ARP için kullanılmıştır. GAMS optimizasyon programında yazılan matematiksel model, programın 24.8.2 versiyonu ile CPLEX çözücüsü kullanılarak Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Liu ve diğ.(2014)'nun sonuçları ile karşılaştırılmış ve Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: GAMS programında kodlanan model çıktılarının literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması tablosu

Örnek	C_N	D_N	Q	Kodlanan Model Çözümü			Liu ve diğ.		
				CPLEX	$t_c(s)$	GAP(%)	CPLEX	$t_c(s)$	GAP(%)
P01	50	4	80	386,18*	283,91	4	386,18*	14.891,2	0
P02	50	4	160	375,93*	113,05	0	375,93*	11,2	0
P12	80	2	60	953,26*	10,97	0	953,26*	5,0	0
Pr01	48	4	200	647,03*	33,56	0	647,03*	17,1	0
Pr07	72	6	200	821,25*	743,05	0	821,25*	154,2	0

*En uygun çözüm

Yukarıda sonuçları verilen örneklerde de görüldüğü gibi kodlaması yapılan modelin 5 adet örnek için Liu'nun sonuçları ile eşleştiği ve en uygun çözüm olduğu anlaşılmaktadır. Liu ve diğ. (2014) modeli örnek sonuçlarının aynısını GAMS programında bulmamız, bu model üzerinden hatasız ilerleyebileceğimizi göstermektedir. Bir sonraki bölüm olan Beşinci Bölüm'de matematiksel model oluşturma aşamasında, Liu ve diğ. (2014) tarafından geliştirilen ÇDA_ ARP modelinden ve Kuah ve Perl (1989) tarafından geliştirilen BOAT problemi modelinden yararlanılarak bir matematiksel model yazılmıştır.

Kuah ve Perl (1989), daha iyi entegre besleyici-otobüs/demiryolu hızlı transit sistemleri tasarlayarak toplu taşıma operasyonlarının maliyet etkinliğini artırma potansiyeli yaygın olarak kabul edilmiştir. Makalede BOAT problemi, mevcut bir ray sistemine erişmek için otobüs ağları tasarlanması olarak tanımlanmaktadır. BOAT problemi, çoktan bire (M-1) ve çoktan-çoka (M-to-M) olmak üzere iki farklı talep modeli olarak değerlendirilmiştir. BOAT problemi için M-1 kapsamında bir matematiksel model sunulmuştur. Ardından bu matematiksel modelin BOAT problemini de M-M için genelleştirilebileceği gösterilmiştir. BOAT problemi, birden fazla karar değişkenine sahip zor çözülen bir ARP'dir. Çalışma frekansını dahil etmek için tasarruf yaklaşımını genelleyen bir sezgisel model sunulmuştur. Hesaplamalı analiz, önerilen sezgisel yöntemin uygulanabilir ağları sağladığını göstermektedir. Yapılan karşılaştırma, önerilen yöntemin elle tasarlanmış ağlardan daha üstün çözümler sunduğunu göstermektedir. Bu yöntem, önerilen matematiksel modelin değişken talep altında önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir.

Martins ve Pato (1998), yaptıkları çalışmada toplu taşıma sistemlerinde ortaya çıkan belirli bir soruna yönelik hesaplama çözümleri hakkında bilgi vermektedir. Herhangi bir otobüs durağında bulunan yolcular merkez istasyon olarak tanımlanan ortak bir varış noktasına ulaşmak için otobüs güzergahlarını tercih etmektedir. Amaç, hem yolcu hem de operatör maliyetlerinin dikkate alındığı bir fonksiyonu en küçükmektir. Bu problem, doğrusal olmayan ve karma tam sayılı problem olarak formüle edilebilir. BOAT problemi, NP-Zor olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma, literatürden alınan sezgisel prosedürün geliştirilmesine odaklanmaktadır. Başlangıç modülü, iki aşamalı bir yöntemle bir çözüm oluşturur. Son modül için yerel aramanın yanı sıra farklı stratejilere sahip TA sezgisel yöntemlerini içerir. Ek olarak, gerçek yaşam durumlarını simüle eden bir dizi problemin hesaplama sonuçları incelenmiştir. Bu deney sayesinde yazarlar, TA'nın en basit hali ile umut verici yöntemlerden biri olduğu sonucuna varmışlardır.

Kuan ve diğ. (2004), BOAT probleminin çözümünde, BTA ve TA olmak üzere iki meta-sezgisel algoritmanın tasarımını ve analizini önermektedir. Sonuçlar literatürde yayınlanan çözümlerle karşılaştırılmıştır. Bu sezgisellerin verimlilik ve çözüm kalitesi açısından performanslarını değerlendirmek amacıyla rastgele üretilen çeşitli test problemleri üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Hesaplamalı

deneyler, TA'nın problemi çözmeye BTA'dan daha etkili bir meta sezgisel olduğunu göstermiştir. Çalışmada, BOAT problemi için Kuah ve Perl (1989), Martins ve Pato (1998) çalışmaları genişletilmeye çalışılmıştır. Demiryolu taşımacılığı ağının önceden tanımlandığı ve sabit olduğu varsayımıyla otobüs ağ tasarımı bulmaya yönelik olan çalışmada, frekansı içerecek bir sezgisel model önerilmiştir. Bazı sezgisel prosedürlerin yanı sıra, farklı stratejiler içeren TA sezgiseli kullanılarak geliştirilmiştir. Sonuçlar, TA'nın çok iyi çözümler ürettiğini göstermiştir.

Kuan ve diğ. (2006), BOAT problemini çözmek için GA ve KKA kullanılmıştır. Bu önerilen yöntemin performansını ölçmek için bir araştırma yapılmıştır. Hesaplama verimliliğini ve çözümlerin kalitesini değerlendirmek için rastgele oluşturulmuş birkaç test problemi üzerinde analiz yapılmıştır. Sonuçlar literatürde yayınlanan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı deneyler, GA ve KKA'nın BTA ve TA gibi algoritmalarla rekabet edebildiğini göstermiştir.

Mohaymany ve Gholami (2010), yüksek kapasiteli toplu taşımacılığın önemli hizmet performansı yetenekleri, onu büyük metropol ulaşım sisteminin önemli bir parçası haline getirmektedir. Maalesef, şehir genelinde yüksek kapasiteli toplu taşıma araçlarına doğrudan erişim sağlamak zordur. Diğer toplu taşıma metotları, yolcuları yüksek kapasiteli toplu taşıma noktalarına ulaştırmak için besleyici olarak kullanılır. Besleme hatlarını kullanarak, daha geniş bir alan için yolculuk talebi karşılanabileceğinden, yüksek kapasiteli ulaşım metodunun kullanılma olasılığı artmaktadır. Araştırmada, besleyici ağ tasarımında kullanıcı, operatör ve sosyal maliyetlerin en aza küçüklenmesi amacıyla farklı kapasitelerde ve performanslarda setler kullanılmıştır. Çalışmada, tren istasyonlarını besleyen otobüsler ve minibüsler kullanılmıştır.

Ciaffi ve diğ.(2012) tarafından talebin karşılanması için demiryolu istasyonu ve ana otobüs ağının durakları ile bağlantılı olarak çalışan BOAT problemi ele alınmaktadır. Araştırmanın amacı, gerçek boyutlu büyük bir kentsel alanda besleyici otobüs ağının eş zamanlı olarak rotalarını ve frekanslarını üreten bir prosedürün geliştirilmesidir. Çözüm prosedürü 2 aşamada belirtilmektedir. Birincisinde, sezgisel bir algoritma, servis kapsama alanının en üst düzeye çıkarılması ile toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi arasında iyi bir denge sağlamak için rota kümeleri üretir. İlk set, ana otobüs ağının GSP ile çözüldüğü dairesel yollardan oluşur. İkinci

uygulanabilir küme, en kısa yol algoritmasını kullanarak daha yüzeysel yollar geliştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen prosedür, etkinliğini mevcut otobüs ağların performanslarıyla karşılaştırmak için gerçek boyutuyla Winnipeg ve Roma'da uygulanmıştır. Tasarım prosedürünün uygulama sonuçları; transfer sayısındaki artışa rağmen, toplam seyahat süresinde bir azalma ile daha entegre bir otobüs ağı oluşturduğunu göstermektedir.

Deng ve diğ. (2013) tarafından kent içi demiryolu hattı ve otobüs güzergahlarından oluşan aktarma ağına dayalı olarak, seyahat maliyeti ve otobüs işletme maliyetini en küçüklemek için M'den M'ye yolcu talep modeli altında BOAT problemi incelenmiştir. Daha kapsamlı olarak düşünüldüğünde problem; yolcu seyahat maliyeti, otobüs bekleme maliyeti, otobüs işletme maliyeti, otobüs ve trenler arasındaki transfer maliyeti ve tren işletme maliyetini içermektedir. Belli kısıtlamalar altında optimum besleyici otobüs yolu çalışma frekansını belirleyen yeni bir GA sunulmuştur. M'den M'ye yolcu talep modelleri altında sayısal örnekler verilmiştir. Çözüm, algoritmanın makul sonuçlar sağlayabildiğini ve yolcu talep dağılımlarının BOAT yapısını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Almasi ve diğ. (2014), toplu taşımayla ilgili artan endişenin, yolcuları toplu taşıma araçlarına ulaştırılamadığından kaynaklandığını belirtmektedir. Bu problemi çözebilmek için, daha gelişmiş bir BOAT önemli rol oynamıştır. Makale, BOATÇ problemi üzerinde yapılan bazı çalışmaları, problem tanımını, problem özelliklerini ve çözüm yaklaşımlarını içermektedir. Problem, veri hazırlama, tasarım, rota oluşturma ve zaman çizelgeleme gibi farklı alt problemlerden oluşmaktadır. Karşılaştırma yapabilmek için daha önceki çalışmaların tanımlayıcı analizi ve sınıflandırması sunulmuştur. Sonuç olarak, gelecekteki araştırmalar için analiz ve karşılaştırmalı çözümler sunulmuştur.

Problem, bir dizi otobüs güzergahını tasarlamayı ve maliyeti en aza indirecek şekilde güzergahın servis sıklığını belirlemeyi amaçlamaktadır. Dengeyi sağlamak için operatör maliyetleri ve kullanıcı maliyetleri arasında optimum sonuç bulunmaya çalışılmaktadır. Operasyon maliyetleri, filo ile ilgili işletme maliyetini ve araç çalışma saatleriyle ilgili olan değişken maliyeti içermektedir. BOAT, raylı sistemdeki sürüş süresini belirlediğinden, hem otobüs hem de raylı sistemde maliyet hesaplanmaktadır.

BOAT problemi için, TA ve BTA yöntemleri uygulanan matematiksel model aşağıda verilmiştir (Kuah ve Perl, 1989);

Notasyonlar

ASH : Saat başına maksimum mevcut koltuk

C_{js} : İstasyon j' den s' ye birim bekleme ve sürüş süresi maliyeti ($\$/Yolcu$)

c : Otobüs kapasitesi

D_k : k rotasının maksimum uzunluğu (km)

I : Durak sayısı ($1, \dots, I$)

J : İstasyon sayısı ($I+1, \dots, I+J$)

K : Rota sayısı

L_{ih} : i noktası ile j noktası arasındaki mesafe (km)

N : Düğümler kümesi

Q_i : i noktasındaki saat başı ortalama talep ($Yolcu/Saat$)

\bar{Q} : Durma başına saatlik ortalama talep ($Yolcu/Saat$)

U : Ortalama otobüs işletim hızı ($Km/Saat$)

λ_0 : Birim otobüs işletim maliyeti ($\$/Araç - km$)

λ_r : Bir yolcunun saatlik biniş maliyeti ($\$/Yolcu * saat$)

λ_w : Bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti ($\$/Yolcu * saat$)

ρ_L : Otobüs yük faktörü

İndisler

h : düğüm indeksi (otobüs veya istasyon); $h = 1, \dots, I + J$

i, m : otobüs indeksi; $i, m = 1, \dots, I$

j : istasyon indeksi; $j = I + 1, \dots, I + J$

k : otobüs rota indeksi; $k = 1, \dots, K$

s : varış istasyonu

Değişkenler

$$x_{ihk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } k \text{ rotasında } i \text{ noktasından } h \text{ noktasına seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{Diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } i \text{ durağı } j \text{ istasyonuna bağlandı ise} \\ 0, & \text{Diğer durumda} \end{cases}$$

F_k : k . rotanın servis frekansı

Matematiksel Model;

Enk Z

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=I+1}^{I+J} C_{js} \sum_{i=1}^I Q_i y_{ij} + 2\lambda_0 \left[\sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} x_{ihk} \right] \\ &+ \frac{\lambda_r}{2U} \sum_{k=1}^K \left[\left(\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} x_{ihk} \right) \left(\bar{Q} + \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} Q_i x_{ihk} \right) \right] \\ &+ \lambda_w \left[\sum_{k=1}^K \frac{1}{2F_k} \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} Q_i x_{ihk} \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Modelin kısıtları;

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{I+J} X_{ihk} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+J} X_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$\sum_{h=1}^{I+J} x_{ihk} - \sum_{m=1}^I x_{mik} \geq 0, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3.14)$$

$$\sum_{i \notin H} \sum_{h \in H} \sum_{k=1}^K x_{ihk} \geq 1, \quad \forall H \quad (3.15)$$

$$\sum_{h=1}^{I+J} x_{ihk} + \sum_{i=1}^I x_{ijk} - y_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in I, k \in K, j \in J \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i \sum_{h=1}^{I+J} x_{ihk} \leq c \cdot F_k \quad \forall k \in K \quad (3.17)$$

$$\frac{2 \cdot c}{\rho_L \cdot U} \sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} x_{ihk} \leq ASH \quad (3.18)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^{I+J} L_{ih} x_{ihk} \leq D_k, \quad \forall k \in K \quad (3.19)$$

$$x_{ihk}, y_{ij} = \{0,1\}, \quad F_k \geq 0 \quad \forall i, j, h, k$$

Burada Eşitlik (3.11) maliyeti en küçüklemeyi hedefleyen amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Amaç fonksiyonu dört bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, raylı sistem maliyeti, otobüs işletme maliyeti, yolcuların otobüse binme maliyeti ve yolcuların otobüs bekleme maliyetidir. Otobüs binme ve bekleme maliyetleri, yolcu başına ve zamanın saatlik diliminin maliyet fonksiyonu şekline dönüştürülmesi ile hesaplanmaktadır. Kısıt (3.12), her otobüs durağının sadece bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.13) her otobüs rotasının bir rotaya bağlanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.14) bir rotaya giren otobüsün aynı noktadan ayrılması gerektiğini belirtmektedir. Kısıt (3.15) her bir besleyici otobüs rotasının bir istasyona bağlanmasını gerektirmektedir. Kısıt (3.16) bir durağa yalnızca o istasyonda sonlanan bir rota bu duraktan geçerse atanabilir. Kısıt (3.17), aynı rotaya bağlı duraklardaki toplam yolcu sayısı limitidir. Kısaca bir rotada taşınacak toplam yolcu sayısında kısıtlamayı sağlamaktadır. Kısıt (3.18), filo tarafından sağlanacak toplam koltuk-saat aşılması gerekir. Kısıt (3.19), rota uzunluğu sınırlaması getirmektedir.

Problemin çözümünde örnek alınan sistem 55 adet otobüs durağından ve 4 adet istasyondan oluşmaktadır. Bu düğüm noktalarının konumları koordinat olarak x-y düzleminde verilmiştir. İki nokta arası uzaklık ise Pisagor bağlantısına göre $L_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Otobüs durak

koordinatları ek olarak Tablo A.1, istasyon durak koordinatları Tablo A.2’de verilmektedir. Duraklardaki yolcu talebi Q_i sabit olarak alınmış ve durak başına 200 yolcudur.

Amaç fonksiyonunda belirtilen maliyetler 4 farklı kalemden oluşmaktadır. Bu maliyetlerin hesaplanması için ise sabit bazı girdilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde Ele alınan problem ile ilgili veriler Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

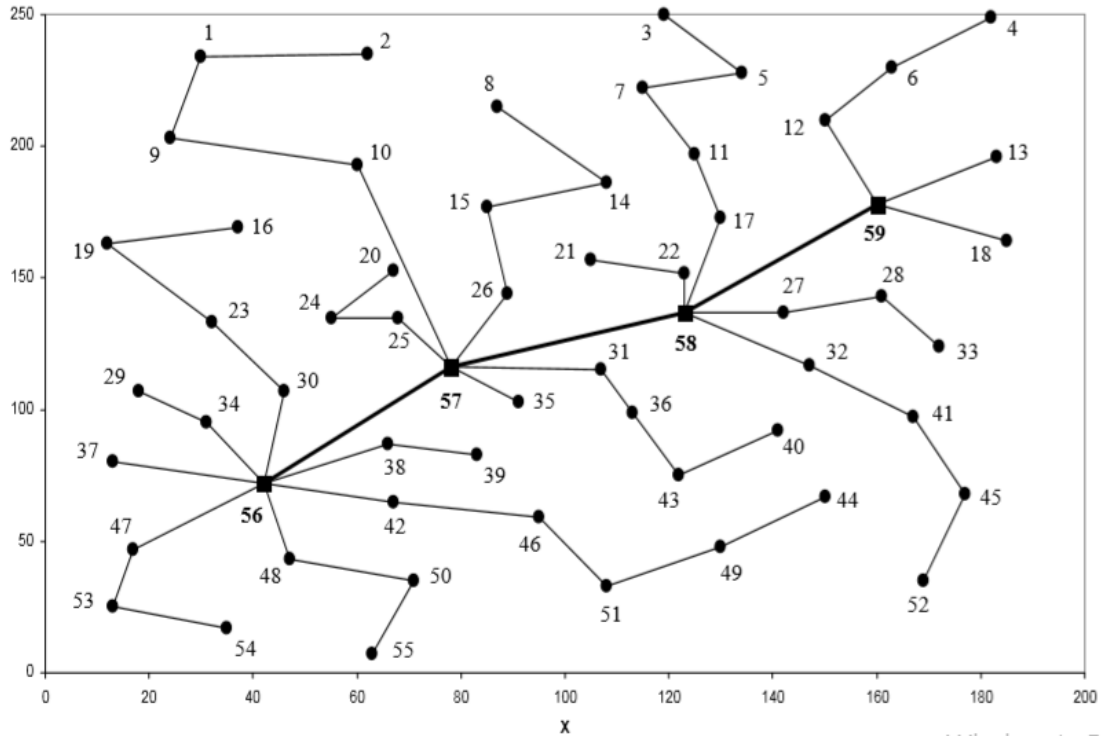
Tablo 3.2: Beslemeli otobüs ağ tasarım model verileri

Sembol	Birim	Değer
ASH	Saatlik koltuk	5500
c	Yolcu	50
D	Km	2,5
I	Adet	1,2,...,55
J	Adet	56,57,58,59
U	Km/Saat	20
λ_0	\$/ (Araç-km)	3,0
λ_r	\$/ (Yolcu*saat)	4,0
λ_w	\$/ (Yolcu*saat)	8,0
C_{js}	\$/Yolcu	0,15
ρ_L	Miktar	1

Kuan ve diğ. (2004) yaptığı çalışmada TA algoritmasına göre yukarıdaki veriler kullanılarak buldukları sonuç Şekil 3.1’de belirtilen rota bağlantıları şeklinde olmuştur.

Verilen model karma tam sayı doğrusal olmayan programlama modelindedir. Kuan ve diğ. (2004)’nin yaptığı çalışmada; geniş amaç fonksiyonu, toplam yolcu sayısı limiti ve toplam koltuk saat limiti altında çözülmüş ve sonuç ağ tasarımı Şekil 5.2’deki gibi olmuştur. Bu modele göre amaç fonksiyonunu 6338\$ olmaktadır.

Literatürde yapılmış olan bu çalışmalarla, ARP’nin farklı çeşitleri için tasarımlar ortaya çıkmıştır. ARP’nin temel amacı mesafeyi veya maliyeti en küçük seviyede olacak şekilde rotaların tasarlanmasıdır.



Şekil 3.1: Kuan ve diğ. (2004) tarafından çözülen problem ağ tasarımı

Gerçek hayat problemleri düşünülerek araç kapasitesi, maksimum rota uzunluğu, kullanılabilir araç sayısı gibi etkenler kısıt olarak modellere eklenmektedir. ARP'ler, GA, TA, BTA gibi yöntemler kullanılarak daha kısa sürede daha uygun sonuçların bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışma ile birlikte ÇD_ARP'nin uygulaması olan BOAT problemi incelenecektir. Sistem tasarımı ile birlikte, hem rotalamanın işletme maliyetlerini hem de yolcuların durumlarından kaynaklı maliyetleri değerlendirip konsolide bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Literatürde bu tür çalışmaların az olması ve otobüs ile raylı sistemin bütünleşik bir şekilde incelenmek istenmesinden dolayı bu çalışma ihtiyaç olmuştur. Yolcuların duraklarda bekleme sürelerinin düşürülmesi ve istasyonlara yolcu dağılımının dengelenmesi ile birlikte otobüs durakları ile istasyon duraklarının birbirine bağlı ve bütünleşik çalışması sağlanacaktır. Rotaların açık uçlu olması ve birden çok istasyondan rota bağlantısının olması dolayısıyla ÇD_ARP'nin BOAT uygulaması üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

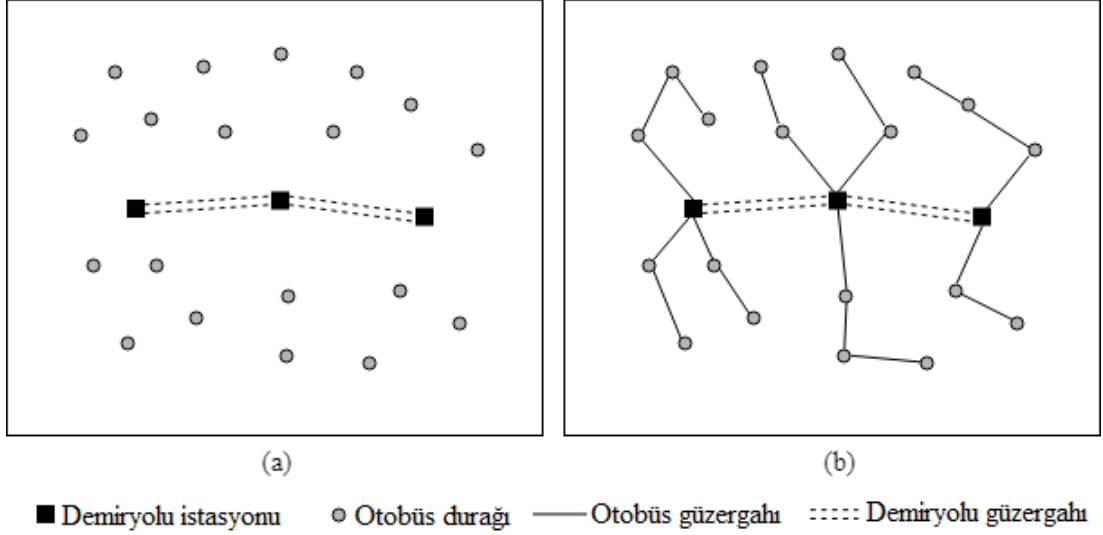
4. BESLEYİCİ OTOBÜS AĞ TASARIM PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ

BOAT problemi, ÇDA_ARP'nin bir uygulamasıdır. ÇDA_ARP birçok alanda kullanılmaktayken; BOAT probleminin hedefi, duraklardan otobüsler vasıtasıyla belirli istasyonlara yolcuları taşımak için rotalar oluşturmaktır. Bunun için BOAT problemi, ÇDA_ARP'nin alt yapısını kullanmaktadır.

4.1 Problemin Tarifi

Günümüzde, şehir içi ulaşımda otobüs ile sağlanan toplu taşıma hizmetlerini, yeni kurulacak bir raylı sistem ile entegrasyonunu sağlayarak ulaşımı daha kaliteli bir şekilde getirmek ve aynı zamanda maliyeti düşürmek yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Bu entegrasyonda otobüs ağı, yolcuları belirli bir bölgeden şehir merkezine uzanan sabit bir demiryolu ağına taşır. Birlikte çalışan bu toplu taşıma sisteminin seyahat sürelerini, işletme ve kullanıcı maliyetlerini azaltması beklenmektedir. İşletme maliyeti, otobüsler tarafından kat edilen toplam mesafenin bir fonksiyonu olarak tanımlanırken, kullanıcı maliyeti, hem otobüslerde hem de trenlerde bekleme ve seyahat sürelerinin bir fonksiyonudur.

Problemdede, Şekil 4.1 (a)'da gösterildiği gibi demiryolu istasyonlarını birbirine demiryolu güzergahının bilindiği varsayılmaktadır. Demiryolu ve durakları oluşturan düğümler arasındaki mesafeyi belirlemek için otobüs ve demiryolu duraklarının yeri önceden belirtilmelidir. ÇPDAUARP için; depoları, demiryolu istasyonları temsil etmektedir. Yolcu taleplerinin otobüs duraklarında olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, demiryolu sistemindeki seyahat maliyeti, maksimum otobüs güzergah uzunluğu, planlama süresinde otobüs filosunun kapasitesi ve işletme hızı belirtilmelidir. Bu varsayımlar altında, tüm otobüs duraklarının demiryolu istasyonlarına bağlandığı örnek bir çözüm Şekil 4.1 (b) 'de verilmiştir.



Şekil 4.1: A_ ARP için istasyonlar ile otobüs durakları bağlantısı

Şehir içi ulaşımda otobüsler ve raylı sistemler yaygın kullanılanlardır. Bu ulaşım alternatiflerinin ayrı bir sistem olarak değerlendirilmesi bazı sorunlara yol açabilmektedir. Bu sorunlar arasında; duraklarda yığılmalar, kapasite kullanımının optimum düzeyde sağlanamaması, uzun süren yolculuklar, rotaların düzgün oluşturulamaması ve bunlara bağlı olarak maliyet artışları gösterilebilir.

Bu çalışmada, otobüsler ile raylı sistemin birlikte çalışması sağlanacaktır. Raylı sistem, konum olarak otobüs ağının ortasında bulunmaktadır. Raylı sistem istasyonları otobüs rotalarının başlangıç noktası, bir otobüs durağı da rotanın bitiş noktası olacaktır. Herhangi bir duraktan otobüse binen bir yolcu istasyona gelebilecek, yolcuğuna hem raylı sistemle hem de istasyonlara bağlı otobüsler ile devam edebilecektir. Böylece, yolculuk talebinin otobüs hatlarında olan dağılımında raylı sistemin etkisi olacaktır.

Problem genel olarak şu şekilde tanımlanabilir; yolcular i adet duraktan j adet istasyona bağlanan rotalar ile seyahat etmek istediğı noktaya en az maliyetle ulaştırılmak istenmektedir. Model, bir i durağının, diğeri i' durağından geçerek veya geçmeden j . istasyona bağlanmasını sağlamaktadır. F frekansı, rotaya bağlanan duraklardaki toplam talebi ($\sum Q_i$) karşılayacak şekilde sefer sayılarını belirtmektedir.

Problemde duraklar için yolcu talep miktarı ve otobüsler için ise kapasite bulunmaktadır. Kapasite, bu koşullar altında sabit ve tüm otobüsler için aynıdır. Modelin çözüm arama aşamasında ise; istasyona gelecek maksimum yolcu sayısı,

filo tarafından sağlanacak toplam koltuk-saat ve rota uzunluğu kısıtı bulunmaktadır. Bu kısıtlara uygun olacak şekilde maliyeti minimum yapan, otobüs duraklarının demiryolu istasyonlarına bağlanacağı rotalar sisteminin kurulması hedeflenmektedir.

Modelin amaç fonksiyonunda 4 farklı maliyet bileşeni bulunmaktadır. Bunlar; raylı sistem maliyeti, otobüs işletme maliyeti, yolcuların otobüs binme maliyeti ve yolcuların otobüs bekleme maliyetidir. Raylı sistem maliyeti; istasyon noktası j' 'den $(j + 1)$ 'e yolcu başına birim bekleme ve sürüş süresi maliyetinin ilgili istasyona gelen toplam yolcu sayısı ile çarpımı şeklinde verilmiştir. Otobüs işletme maliyeti; araçların km başına işletim maliyeti olan λ_0 ile, bağlantılı iki durak arası mesafeyi temsil eden L_{ih} ve bu duraklara uğrayan saatlik araç sayısının çarpımı şeklinde verilmektedir. Yolcuların otobüs binme maliyeti; yolcunun saatlik biniş maliyeti olan λ_r ile, rotanın toplamının kaç saatte kat edildiği ve bu duraklardan alınan yolcuların çarpımı şeklinde hesaplanmaktadır. Bu maliyet kalemi, amaç fonksiyonu değerini yükseltmemek amacıyla rotaların gereksiz bir şekilde bir önceki istasyona bağlanmasını önlemektedir. Böylelikle istasyonlar arasında bir denge sağlanmaktadır. Yolcuların otobüs bekleme maliyeti; bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti olan λ_w ile, iki otobüs arası sürede duraktaki yolcu sayısının çarpımı şeklinde tanımlanmıştır.

Kuah ve Perl (1989), BOAT problemini ağ optimizasyon problemi olarak tanımlamaktadır. Ağ, sırasıyla tren istasyonlarını ve otobüs duraklarını temsil eden iki tür düğümü içermektedir. Benzer şekilde, demiryolu bağlantıları demiryolu hattı bölümlerini temsil ederken, otobüs bağlantıları BOAT'ı temsil etmektedir. Otobüs duraklarının yerleri önceden belirlenmiştir. Talebin otobüs düğümlerinde yoğunlaştığı ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu talep, özellikle ağ tasarımı ve yeri gibi stratejik problemlerle uğraşan ağ modelleri için ortaktır. BOAT problemi için önerilen ağ modeli esnek olmayan bir yapıdadır. Bu varsayım problemin karmaşıklığı nedeniyle gerekli görülmüştür. Modelin farklı sayılardaki yolcu talebini içerecek şekilde genelleştirilmesi gelecekteki çalışmalar için önemli bir alan olarak görülmektedir.

BOAT problemi, hem kaynak kısıtlamalarını hem de ulaşım talebini karşılamak için bir dizi besleyici otobüs güzergahının tasarlanmasını ve hizmet frekanslarının tanımlanmasını gerektirmektedir (Martins ve Pato 1998).

4.2 Formülasyon ve Matematiksel Model

ÇD_arp probleminde BOAT uygulamasını etkin çözebilmek ve gerçeğe yakın kısıtlar ekleyebilmek için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. ARP ve onun bir çeşidi olan ÇDA_arp'nin farklı alanlarda ve farklı amaçlarla kullanıldığı belirtilmiştir. Bu problem çeşidinin önemli özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Liu ve diğ. 2012);

- (1) Her müşteri düğümü bir rotada ziyaret edilmektedir.
- (2) Rota, bir depodan başlayıp bir müşteri düğümünde sona ermektedir.
- (3) Müşterilerin herhangi bir rotadaki toplam talebi Q 'yu geçmemektedir.
- (4) Herhangi bir araç yolunun seyahat mesafesi önceden belirlenmiş bir H değerini aşmamaktadır.

Çalışması yapılan bu problem için tanımlamalar şu şekildedir;

Notasyonlar

ASH : Saat başına maksimum mevcut koltuk

C_{mj} : İstasyon nokt. j 'den $(j + 1)$ 'e birim bekl. ve sürüş süresi mal. ($\$/Yolcu$)

c : Otobüs kapasitesi

H : Maksimum rota uzunluğu (km)

I : Durak sayısı (1, ..., I)

J : İstasyon sayısı (I+1, ..., I+J)

K : Rota sayısı

C_{ij} : i noktası ile j noktası arasındaki mesafe (km)

N : Düğümler kümesi

q_i : i noktasındaki saat başı ortalama talep ($Yolcu/Saat$)

Q : Tüm duraklardaki en büyük saatlik talep ($Yolcu/Saat$)

\bar{Q} : Durma başına saatlik ortalama talep (*Yolcu/Saat*)

U : Ortalama otobüs işletim hızı (*Km/Saat*)

λ_0 : Birim otobüs işletim maliyeti ($\$/Araç - km$)

λ_r : Bir yolcunun saatlik biniş maliyeti ($\$/Yolcu * saat$)

λ_w : Bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti ($\$/Yolcu * saat$)

ρ_L : Otobüs yük faktörü

İndisler

i, j : Düğüm indeksi (otobüs veya istasyon); $i, j = 1, \dots, I + J$

k : Otobüs rota indeksi; $k = 1, \dots, K$

Değişkenler

$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } k \text{ rotasında } i \text{ noktasından } j \text{ noktasına seyahat oldu ise} \\ 0, & \text{Diğer durumda} \end{cases}$

F_k : k . rotanın servis frekansı

BOAT problemi için geliştirdiğimiz matematiksel model bu bölümde anlatılmıştır. Problemden çözüm için hedeflenen maliyetin minimize edilmesidir. Bu nedenle amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

Enk Z

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=I+1}^{I+J} C m_j \sum_{i=1}^I q_i x_{ijk} + 2\lambda_0 \left[\sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} C_{ij} x_{ijk} \right] \\ &+ \frac{\lambda_r}{2U} \sum_{k=1}^K \left[\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} C_{ij} x_{ijk} \right) \left(\bar{Q} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} q_i x_{ijk} \right) \right] \\ &+ \lambda_w \left[\sum_{k=1}^K \frac{1}{2F_k} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} q_i x_{ijk} \right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Geliştirilen modelin kısıtları aşağıdaki gibidir;

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I+J} X_{ijk} = 1, \quad \forall j \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=I+1}^{I+J} \sum_{j=1}^I X_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^{I+J} x_{ijk} - \sum_{j=1}^I x_{jik} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4.4)$$

$$u_i - u_j + Q * x_{ijk} \leq Q - q_j \quad \forall i \in I, k \in K, j \in I \setminus k \quad (4.5)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$u_j = 0 \quad \forall j \in (I + 1, \dots, I + J) \quad (4.7)$$

$$h_i - h_j + H * x_{ijk} \leq H - c_{ij} * x_{ijk} \quad \forall i \in I, k \in K, j \in I \setminus k \quad (4.8)$$

$$0 \leq h_i \leq H \quad \forall i \in I \quad (4.9)$$

$$h_j = 0 \quad \forall j \in (I + 1, \dots, I + J) \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i \sum_{j=1}^{I+J} X_{ijk} \leq c * F_k \quad \forall k \in K \quad (4.11)$$

$$\frac{2 * c}{\rho_L * U} \sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} C_{ij} X_{ijk} \leq ASH \quad (4.12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{I+J} C_{ij} X_{ijk} \leq H, \quad \forall k \in K \quad (4.13)$$

$$\sum_{i=1}^{I+J} x_{ijk} = \sum_{i=1}^{I+J} x_{jik} \quad \forall j \in (1, \dots, I + J), k \in K \quad (4.14)$$

$$X_{ijk} = \{0,1\}, \quad F_k \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (4.15)$$

Eşitlik (4.1) ile belirtilen amaç fonksiyonu maliyeti minimize etmeyi hedeflemektedir. Kısıt (4.2), her otobüs durağının sadece bir rotaya atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.3) her otobüs durağının sadece bir istasyona atanmasını

sağlamaktadır. Kısıt (4.4) bir rotaya giren otobüs aynı noktadan ayrılmalıdır. Bir otobüs durağından tekrar aynı noktaya gelmeyi engellemektedir. Kısıt (4.5), (4.6) ve (4.7) alt tur ve özel turların oluşmasını engellemeyi sağlamaktadır. Kısıt (4.8), (4.9) ve (4.10) birbirine bağlanan noktaların hareket mesafeni kontrol etmekte ve rota uzunluğu dengesi kurmaktadır. Kısıt (4.11), aynı rotaya bağlı duraklardaki toplam yolcu sayısı limitidir. Kısaca bir rotada taşınacak toplam yolcu sayısında kısıtlamayı sağlamaktadır. Kısıt (4.12), filo tarafından sağlanacak toplam koltuk-saat aşılması gerekmektedir. Kısıt (4.13), rota uzunluğu sınırlaması getirmektedir. Kısıt (4.14), depo ve istasyon düğümlerinin dengesini kurmaktadır. Kısıt (4.15), bütünlük kısıtlamasıdır.

Tanımlanan probleme uygun bir şekilde bir matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelde kullanılacak veriler belirlenip bu veriler ile çözüm aranmaktadır.

Çalışma prensibi olarak; başlangıçta otobüs durak ve demiryolu istasyon noktalarının koordinatları arasındaki uzaklıkları hesaplayarak mesafeler matrisi oluşturulur. Sabit verilerle iterasyon sayısı kadar çözüm olacak şekilde durakların ve istasyonların birleştirildiği rotalar oluşturulur. Her bir rota için otobüslerin duraklara uğrama frekansları belirlenir. Oluşturulan bu rotalar için kısıtlar sağlanacak şekilde en küçük maliyetli çözüm sonucunu karşımıza çıkarmaktadır.

5. UYGULAMA

5.1 Vaka Çalışmaları

Uygulama kısmında öncelikle temel ARP için literatürde yapılan modelin mesafe bazlı amaç fonksiyonu incelenmiştir. Sonrasında model geliştirilmiştir. BOAT problemi için geliştirilmiş olan matematiksel model ile problemin değişik alternatifleri ile çözüm sonuçları incelenmiştir. Oluşturulan bütünleşik model küçük veri setlerinde test edilip sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.1.1 Vaka 1

İncelenen birinci vaka, 55 otobüs noktası ve 4 istasyon noktası için temel düzeyde sadece mesafelerin dikkate alındığı amaç fonksiyonu ile çözülmüştür. Otobüs durak koordinatları ek olarak Tablo A.1, istasyon durak koordinatları Tablo A.2'de verilmektedir.

Vakaya ilişkin veriler Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1: Vaka 1 verileri

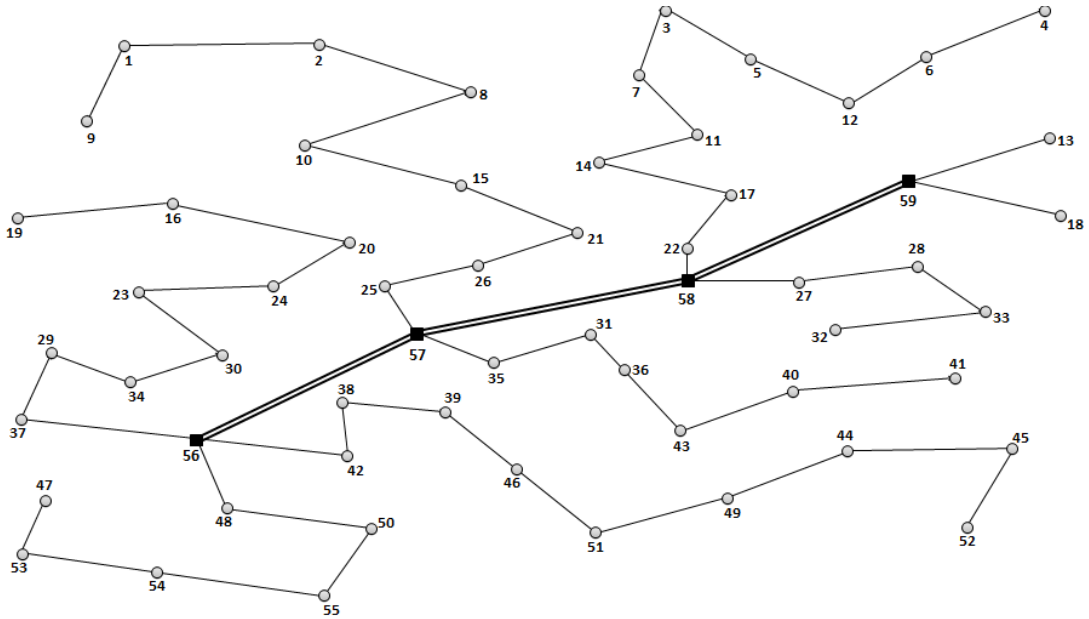
Sembol	Birim	Değer
ASH	Saatlik koltuk	5500
c	Yolcu	50
D	Km	2,5
I	Adet	1,2,...,55
J	Adet	56,57,58,59
U	Km/Saat	20
λ_0	\$/ (Araç-km)	3,0
λ_r	\$/ (Yolcu*saat)	4,0
λ_w	\$/ (Yolcu*saat)	8,0
C_{js}	\$/Yolcu	0,15
ρ_L	Miktar	1

Problem çözümü için 3. bölümde verilmiş olan Kuah ve Perl, (1989) tarafından oluşturulan matematiksel model kullanılmıştır. Problemden bulunan düğüm sayısının çokluğu ve amaç fonksiyonunda birden fazla değişken olması nedeniyle modelin çözüm süresi uzamaktadır. Bundan dolayı toplam yolcu sayısı limiti ve toplam koltuk saat limiti göz önünde bulundurulmadığı durum için problem çözülmüştür.

En kısa mesafeyi baz alan amaç fonksiyonu eşitlik 5.1’de belirtildiği gibi olmaktadır.

$$Enk Z = \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{I+J} \sum_{i=1}^I L_{ih} x_{ihk} \quad (5.1)$$

Model çözümü GAMS programında CPLEX çözücüsü ile 16.000 saniye kısıtı altında %1,9 oranda tolerans ile bulunmuştur. Bulunan sonuca göre rotalar Şekil 5.1’teki gibi oluşmaktadır.



Şekil 5.1: Mesafe bazlı model ağ tasarımı çözüm sonucu

Model çözümünde amaç fonksiyonunda mesafeyi en küçükmeye yönelik ağ tasarım sonucu 1388,66\$ olmaktadır.

5.1.2 Vaka 2

İncelenen ikinci vakada, 16 otobüs durağı ve 4 adet raylı sistem istasyonundan oluşan bir ağ altlığı üzerinde çalışılmıştır. Otobüs kapasitesinin 100 yolcu, maksimum rota uzunluğunun 20 km, otobüs işletme hızının 20 km/saat olduğu durum için 4. bölümde verilmiş olan matematiksel model ile çözüm sonucuna ulaşılmıştır.

Problemin zorluğundan dolayı düğüm sayısının artması ile birlikte program çözüm süresi artış göstermektedir. Bu durum dikkate alınarak toplamda 20 nokta durak olacak şekilde problem çözümü araştırılmıştır.

Otobüs durak koordinatları ve bu duraklara ilişkin müşteri talepleri Tablo 5.2'de, raylı sistem istasyon koordinatları Tablo 5.3'de verilmektedir. X-Y düzleminde verilen koordinatlar için iki nokta arasındaki uzaklık Pisagor bağlantısına göre hesaplanmaktadır. Otobüs duraklarındaki tüm yolcuların 20 numaralı demiryolu istasyonuna gittiği varsayılmaktadır.

Tablo 5.2: Otobüs durak koordinatları ve talep miktarları

Durak No	X koordinatı	Y koordinatı	Talep (Yolcu/Saat)
1	15	12	150
2	42	32	100
3	25	30	250
4	40	8	130
5	12	28	80
6	55	12	50
7	48	34	200
8	25	38	60
9	9	11	120
10	24	6	200
11	57	5	70
12	36	13	180
13	31	26	40
14	54	24	240
15	56	31	30
16	6	20	45

Durak başına ortalama talep 121 yolcu/saat'tir.

Tablo 5.3: Demiryolu istasyonlarının koordinatları

İstasyon No	X koordinatı	Y koordinatı
17	18	23
18	27	19
19	39	20
20	49	15

Vakaya ilişkin değişen veriler Tablo 5.4'te verilmektedir.

Tablo 5.4: Vaka 2 verileri

Sembol	Birim	Değer
<i>c</i>	Yolcu	100
<i>D</i>	Km	20
<i>I</i>	Adet	1,2,...,16
<i>J</i>	Adet	17,18,19,20
<i>U</i>	Km/Saat	20

Otobüs yük faktörü (ρ_L) bir otobüsün kabul edilebilir yolcu sayısı çarpanını belirtmektedir. Model için maksimum hat sayısı (rota) 15 olarak kabul edilmiştir.

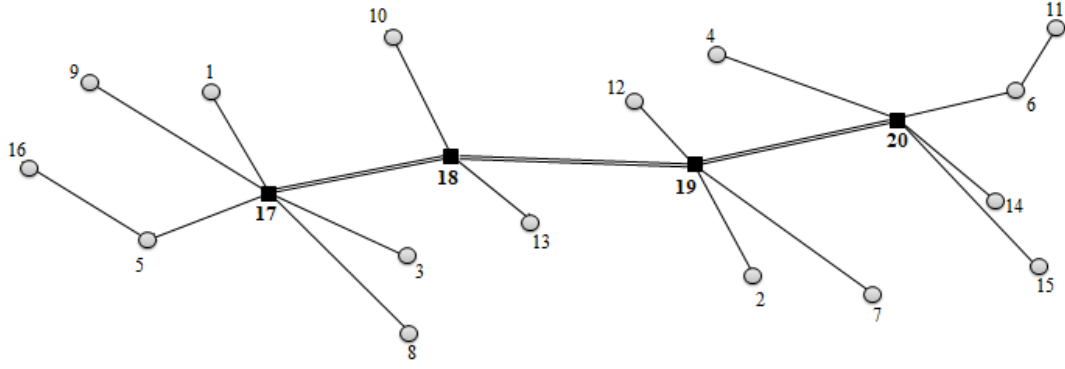
Problem Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda GAMS 24.8.2 yazılım programı DICOPT çözücüsü ile 23,02 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 52596,03 \$ olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonunu oluşturan bileşenler için maliyetler ve bu bileşenlerin toplam maliyetteki yüzdeleri Tablo 5.5'te belirtilmektedir.

Tablo 5.5: Vaka 2 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri

Maliyet Bileşeni	Maliyet (\$)	Yüzde
Raylı sistem maliyeti	272,25	0,52%
Otobüs işletme maliyeti	1457,25	2,77%
Yolcu otobüs binme maliyeti	37569,53	71,43%
Yolcu otobüs bekleme maliyeti	13297,00	25,28%

Buradan da görüleceği üzere maliyet kalemindeki en büyük yüzdeye sahip bileşen %71,43 oran ile yolcu otobüs binme maliyeti olmaktadır. İkinci sırada %25,28 ile yolcu otobüs bekleme maliyeti ve sonrasında sırasıyla %2,77 ile otobüs işletme maliyeti ve %0,52 ile raylı sistem maliyeti gelmektedir.

Problem çözümü sonunda ortaya çıkan ağ yapısı Şekil 5.2'deki gibidir.



Şekil 5.2: Vaka 2 model ağ tasarımı çözüm sonucu

Problemin çözümüne bakıldığında toplamda 14 adet rota oluşmuştur. Bu rotalar ve bu rotalara ait frekanslar Tablo 5.6’da belirtilmektedir.

Tablo 5.6: Vaka 2 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları

Rota No	Rotalar	Rota Uzunl. (km)	Frekans
1	20 6 11	13,99	1,20
2	18 13	8,06	0,40
3	20 14	10,30	2,40
4	18 10	13,34	2,00
5	20 4	11,40	1,30
6	17 1	11,40	1,50
7	19 2	12,37	1,00
8	17 8	16,55	0,60
9	19 12	7,62	1,80
10	17 9	15,00	1,20
11	19 7	16,64	2,00
12	20 15	17,46	0,30
13	17 3	9,90	2,50
14	17 5 6	17,81	1,25

Tüm rotalar düşünüldüğünde toplam rota uzunluğu 181,81 km olmaktadır.

5.1.3 Vaka 3

İncelenen üçüncü vakada, 16 otobüs durağı ve 4 adet raylı sistem istasyonundan oluşan bir ağ altlığı üzerinde çalışılmıştır. Durak ve istasyon koordinatları Vaka 1’de belirtildiği gibidir. Otobüs kapasitesinin 150 yolcu,

maksimum rota uzunluğunun 25 km, otobüs işletim hızının 20 km/saat olduğu durum için 4. Bölümde verilmiş olan matematiksel model ile çözüm sonucuna ulaşılmıştır.

Durak başına ortalama talep 121 yolcu/saat'tir. Otobüs duraklarındaki tüm yolcuların 20 numaralı demiryolu istasyonuna gittiği varsayılmaktadır.

Vakaya ilişkin değişen veriler Tablo 5.7'de verilmektedir.

Tablo 5.7: Vaka 3 verileri

Sembol	Birim	Değer
c	Yolcu	150
D	Km	25
I	Adet	1,2,...,16
J	Adet	17,18,19,20
U	Km/Saat	20

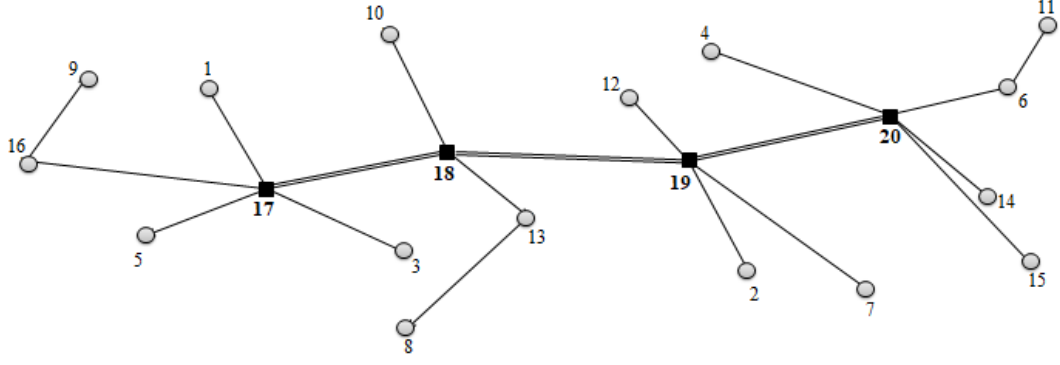
Problem Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda GAMS 24.8.2 yazılım programı DICOPT çözücüsü ile 34,42 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 46645,15 \$ olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonunu oluşturan bileşenler için maliyetler ve bu bileşenlerin toplam maliyetteki yüzdeleri Tablo 5.8'de belirtilmektedir.

Tablo 5.8: Vaka 3 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri

Maliyet Bileşeni	Maliyet (\$)	Yüzde
Raylı sistem maliyeti	271,50	0,58%
Otobüs işletme maliyeti	1012,98	2,17%
Yolcu otobüs binme maliyeti	36272,00	77,76%
Yolcu otobüs bekleme maliyeti	9088,66	19,48%

Buradan da görüleceği üzere maliyet kalemindeki en büyük yüzdeye sahip bileşen %77,76 oran ile yolcu otobüs binme maliyeti olmaktadır. İkinci sırada %19,48 ile yolcu otobüs bekleme maliyeti, ve sonrasında sırasıyla %2,17 ile otobüs işletme maliyeti ve %0,58 ile raylı sistem maliyeti gelmektedir.

Problem çözümü sonunda ortaya çıkan ağ yapısı Şekil 5.3'teki gibidir.



Şekil 5.3: Vaka 3 model ağ tasarımı çözüm sonucu

Vaka 2'deki ağ tasarımı ile karşılaştırıldığında 16 numaralı durak 5 numaralı durağa bağlanıp 17 numaralı istasyona gitmekteyken Vaka 3'de 5 numaralı durak doğrudan 17 numaralı istasyona bağlanmıştır. 16 numaralı durak ise 9 numaralı durak ile bağlantı kurmuştur. Vaka 2'de 8 numaralı durağa hizmet 17 numaralı istasyondan sağlanmakta iken Vaka 3'de 13 numaralı durak ile bağlanarak 18 numaralı istasyon tarafından hizmet verilmektedir.

Problemin çözümüne bakıldığında toplamda 13 adet rota oluşmuştur. Bu rotalar ve bu rotalara ait frekanslar Tablo 5.9'da belirtilmektedir.

Tablo 5.9: Vaka 3 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları

Rota No	Rotalar	Rota Uzunl. (km)	Frekans
1	20 14	10,30	1,60
2	17 5	7,81	0,53
3	20 4	11,40	0,87
4	19 2	12,37	0,67
5	17 16 9	21,86	1,10
6	20 15	17,46	0,20
7	20 6 11	13,99	0,80
8	18 10	13,34	1,33
9	17 3	9,90	1,67
10	18 13 8	21,48	0,67
11	17 1	11,40	1,00
12	19 12	7,62	1,20
13	19 7	16,64	1,33

Tüm rotalar düşünüldüğünde toplam rota uzunluğu 175,57 km olmaktadır. Vaka 2 ile kıyaslandığında %3,45'lik bir oranda daha kısa bir rotalar bütünü ortaya çıkmıştır.

5.1.4 Vaka 4

İncelenen dördüncü vakada, 16 otobüs durağı ve 4 adet raylı sistem istasyonundan oluşan bir ağ altlığı üzerinde çalışılmıştır. Durak ve istasyon koordinatları Vaka 2’de belirtildiği gibidir. Otobüs kapasitesinin 150 yolcu, maksimum rota uzunluğunun 30 km, otobüs işletim hızınının 30 km/saat olduğu durum için 4. Bölümde verilmiş olan matematiksel model ile çözüm sonucuna ulaşılmıştır.

Durak başına ortalama talep 121 yolcu/saat’tir. Otobüs duraklarındaki tüm yolcuların 20 numaralı demiryolu istasyonuna gittiği varsayılmaktadır.

Vakaya ilişkin değişen veriler Tablo 5.10’da verilmektedir.

Tablo 5.10: Vaka 4 verileri

Sembol	Birim	Değer
c	Yolcu	150
D	Km	30
I	Adet	1,2,...,16
J	Adet	17,18,19,20
U	Km/Saat	30

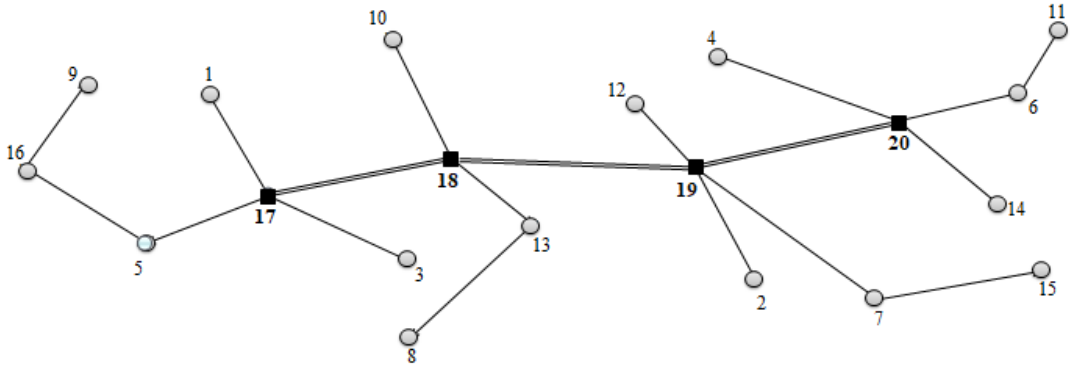
Problem Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda GAMS 24.8.2 yazılım programı DICOPT çözücüsü ile 51,93 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 34157,42 \$ olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonunu oluşturan bileşenler için maliyetler ve bu bileşenlerin toplam maliyetteki yüzdeleri Tablo 5.11’de belirtilmektedir.

Tablo 5.11: Vaka 4 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri

Maliyet Bileşeni	Maliyet (\$)	Yüzde
Raylı sistem maliyeti	229,50	0,67%
Otobüs işletme maliyeti	1188,87	3,48%
Yolcu otobüs binme maliyeti	22626,38	66,24%
Yolcu otobüs bekleme maliyeti	10112,66	29,61%

Buradan da görüleceği üzere maliyet kalemindeki en büyük yüzdeye sahip bileşen %66,24 oran ile yolcu otobüs binme maliyeti olmaktadır. İkinci sırada %29,61 ile yolcu otobüs bekleme maliyeti, ve sonrasında sırasıyla %3,48 ile otobüs işletme maliyeti ve %0,67 ile raylı sistem maliyeti gelmektedir. Araç hızındaki artış yolcu otobüs binme maliyetini yüksek düzeyde düşürmüştür.

Problem çözümü sonunda ortaya çıkan ağ yapısı Şekil 5.4'deki gibidir.



Şekil 5.4: Vaka 4 model ağ tasarımı çözüm sonucu

Vaka 3'teki ağ tasarımı ile karşılaştırıldığında 17 numaralı istasyondan çıkan iki hat birleştirilmiş ve 5, 16 ve 9 numaralı duraklar bir rota oluşturmuştur. 20 numaralı istasyona bağlanan 15 numaralı durak ise 19 numaralı istasyona bağlı olan 7 numaralı durak ile aynı rotada bir hat oluşturmuşlardır.

Problemin çözümüne bakıldığında toplamda 11 adet rota oluşmuştur. Bu rotalar ve bu rotalara ait frekanslar Tablo 5.12'de belirtilmektedir.

Tablo 5.12: Vaka 4 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları

Rota No	Rotalar	Rota Uzunl. (km)	Frekans
1	17 5 16 9	27,30	1,63
2	18 10	13,34	1,33
3	20 4	11,40	0,87
4	19 2	12,37	0,67
5	19 12	7,62	1,20
6	20 6 11	13,99	0,80
7	20 14	10,30	1,60
8	18 13 8	21,48	0,67
9	17 3	9,90	1,67
10	19 7 15	25,19	1,53
11	17 1	11,40	1,00

Tüm rotalar düşünüldüğünde toplam rota uzunluğu 164,28 km olmaktadır. Vaka 3 ile kıyaslandığında %6,43'lik; Vaka 2 ile kıyaslandığında %9,64'lük bir oranda daha kısa bir rotalar bütünü ortaya çıkmıştır.

5.1.5 Vaka 5

İncelenen beşinci vakada, 16 otobüs durağı ve 2 adet raylı sistem istasyonundan oluşan bir ağ altlığı üzerinde çalışılmıştır. Otobüs kapasitesinin 150 yolcu, otobüs işletim hızının 30 km/saat, maksimum rota sayısının 5 olduğu durum için 4. bölümde verilmiş olan matematiksel model ile çözüm sonucuna ulaşılmıştır. Durak ve istasyonlara ait koordinatlar ve talep miktarlar Tablo 5.13 ve Tablo 5.14'te belirtilmektedir.

Tablo 5.13: Vaka 5 otobüs durak koordinatları ve talepleri

Durak No	X koordinatı	Y koordinatı	Talep
1	15	12	150
2	42	32	100
3	25	30	250
4	40	8	130
5	12	28	80
6	55	12	50
7	48	34	200
8	25	38	60
9	9	11	120
10	24	6	200
11	57	5	70
12	36	13	180
13	31	26	40
14	54	24	240
15	56	31	30
16	6	20	45

Tablo 5.14: Vaka 5 demiryolu istasyon koordinatları

İstasyon No	X koordinatı	Y koordinatı
17	18	23
18	49	15

Durak başına ortalama talep 121 yolcu/saat'tir. Otobüs duraklarındaki tüm yolcuların 18 numaralı demiryolu istasyonuna gittiği varsayılmaktadır.

Vakaya ilişkin değişen veriler Tablo 5.15'te verilmektedir.

Tablo 5.15: Vaka 5 verileri

Sembol	Birim	Değer
c	Yolcu	150
D	Km	250
I	Adet	1,2,...,16
J	Adet	17,18
U	Km/Saat	30

Problem Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda GAMS 24.8.2 yazılım programı DICOPT çözücüsü ile 118,13 saniyede çözülmüş olup, amaç değeri 46661,97 \$ olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonunu oluşturan bileşenler için maliyetler ve bu bileşenlerin toplam maliyetteki yüzdeleri Tablo 5.16’da belirtilmektedir.

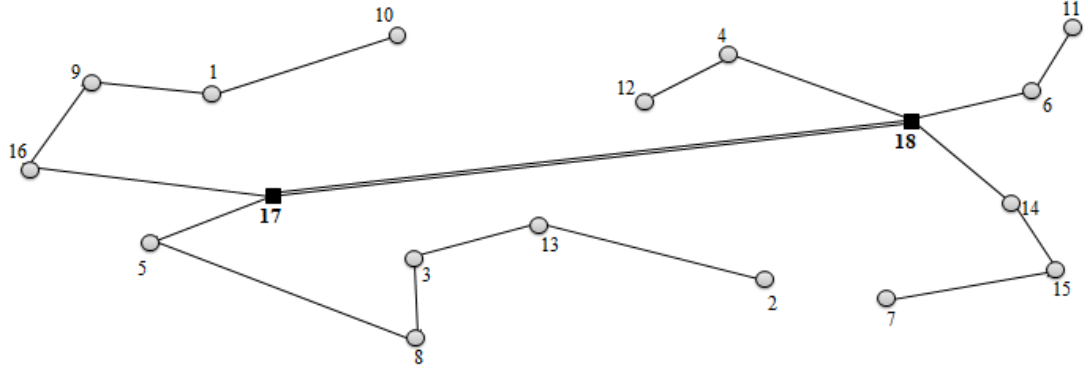
Tablo 5.16: Vaka 5 maliyet bileşen tutar ve yüzdeleri

Maliyet Bileşeni	Maliyet (\$)	Yüzde
Raylı sistem maliyeti	112,50	0,24%
Otobüs işletme maliyeti	2678,73	5,74%
Yolcu otobüs binme maliyeti	20470,07	43,87%
Yolcu otobüs bekleme maliyeti	23400,66	50,15%

Buradan da görüleceği üzere maliyet kalemindeki en büyük yüzdeye sahip bileşen %50,15 oran ile yolcu otobüs bekleme maliyeti olmaktadır. İkinci sırada %43,87 ile yolcu otobüs binme maliyeti ve sonrasında sırasıyla %5,74 ile otobüs işletme maliyeti ve %0,24 ile raylı sistem maliyeti gelmektedir.

Diğer vakalardan farklı olarak yolcu bekleme maliyeti otobüs binme maliyetine göre daha fazladır. İstasyon sayısında yaşanan azalma ile birlikte bir istasyona düşen durak sayısında artış olmuştur. Buna bağlı olarak rota mesafesinin uzaması ve rotada bulunan durak sayısındaki artış buna bağlı olarak bekleyen yolcu sayısını da arttırmaktadır. Bekleyen yolcu sayısındaki artışa bağlı olarak da toplam yolcu bekleme maliyeti, toplam yolcu otobüs binme maliyetinden yüksek olmuştur.

Problem çözümü sonunda ortaya çıkan ağ yapısı Şekil 5.5’deki gibidir.



Şekil 5.5: Vaka 5 model ağ tasarımı çözüm sonucu

Problemin çözümüne bakıldığında toplamda 5 adet rota oluşmuştur. Bu rotalar ve bu rotalara ait frekanslar Tablo 5.17’de belirtilmektedir.

Tablo 5.17: Vaka 5 rotalar, uzunlukları ve rota frekansları

Rota No	Rotalar	Rota Uzunl. (km)	Frekans
1	17 16 9 1 10	38,75	3,43
2	17 5 8 3 13 2	51,95	3,53
3	18 4 12	13,98	2,06
4	18 14 15 7	26,12	3,13
5	18 6 11	17,80	0,80

Tüm rotalar düşünüldüğünde toplam rota uzunluğu 148,6 km olmaktadır.

Tüm vakalar değerlendirildiğinde toplam rota uzunlukları ve maliyetleri Tablo 5.18’de verilmektedir.

Tablo 5.18: Vakalar toplam rota uzunlukları ve toplam maliyet karşılaştırma

Vaka No	Rota Uzunl. (km)	Maliyet (\$)
2	181,81	52596,03
3	175,57	46645,15
4	164,28	34157,42
5	148,60	46661,97

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa en düşük maliyete sahip vaka çalışması 3 numaralı vakadır. Toplam rota uzunluğu olarak en kısa olan çalışma ise 5 numaralı vakadır. Maliyeti ise orta seviyelerde gerçekleşmiştir. Buradan hareketle, rotaların uzunluğu arttıkça rotaların toplam mesafesi azalmaktadır.

5.2 Test Problemleri

Bu bölümde problem 16 adet otobüs noktası ve 4 adet istasyon noktası için; 20, 25 ve 30 km olan maksimum rota uzunluğu; 20, 25 ve 30 km/saat olan ortalama araç hızı; 74, 100 ve 150 yolcu olan otobüs kapasitesi; 8 ve 10 \$/saat olan yolcu bekleme maliyetlerinde değişiklik yapılarak 54 adet alt problem önerilen matematiksel model ile çözülmektedir. Çözümler GAMS 24.8.2 programında 4 çekirdekli Intel(R) Core i5-2410M 2.3 GHz işlemciye ve 4 GB ara belleğe sahip bilgisayarda yapılmıştır.

Problem çözümünde sabit olarak alınan veriler Tablo 5.19'da belirtilmektedir.

Tablo 5.19: Test probleminde sabit olarak alınan veriler

Sembol	Birim	Değer
λ_0	\$/ (Araç-km)	3,0
λ_r	\$/ (Yolcu*saat)	4,0
Cm_j	\$/Yolcu	0,15
ρ_L	Miktar	1
k	Adet	1,...,14*

Otobüs kapasitesi (c) 74 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 8\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.20'de belirtilmektedir.

Tablo 5.20: 74 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (Yolcu)=74 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=8\$ için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
1	20	20	74	57779,96	18,46
2	20	25	74	50266,05	19,66
3	20	30	74	45256,78	20,81
4	25	20	74	57019,81	30,43
5	25	25	74	49765,41	22,58
6	25	30	74	44929,15	28,56
7	30	20	74	57077,60	24,30
8	30	25	74	50289,68	26,16
9	30	30	74	45764,40	30,19

Otobüs kapasitesinin 74 yolcu ve rota uzunluğunun 20 ile 25 km olduğu ve otobüs işletim hızının arttığı durumlar için amaç değeri azalma eğilimindedir.

Otobüs kapasitesi (c) 74 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 10\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.21'de belirtilmektedir.

Tablo 5.21: 74 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (Yolcu)=74 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=10\$ için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
10	20	20	74	62272,19	23,26
11	20	25	74	54758,28	17,40
12	20	30	74	49749,01	20,74
13	25	20	74	61625,56	24,71
14	25	25	74	54371,16	30,02
15	25	30	74	49534,89	23,04
16	30	20	74	62202,26	25,13
17	30	25	74	55414,34	23,35
18	30	30	74	50889,06	26,84

Otobüs işletim hızının sabit olduğu ve maksimum rota uzunluğunun 20 ve 30 km olduğu durumlar için amaç değerinde azalma eğilimi olduğu gözükmektedir. Araç kapasitesi 74 yolcu ve yolcu saatlik bekleme maliyeti 8\$ olduğu durum ile karşılaştırıldığında amaç değeri %7-11 arasında artış olduğu gözlemlenmektedir.

Otobüs kapasitesi (c) 100 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 8\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.22'de belirtilmektedir.

Tablo 5.22: 100 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (Yolcu)=100 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=8\$ için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
19	20	20	100	52596,03	20,36
20	20	25	100	45082,12	21,45
21	20	30	100	40072,85	19,99
22	25	20	100	51695,97	28,62
23	25	25	100	44441,57	23,43
24	25	30	100	39605,30	19,39
25	30	20	100	51121,38	24,08
26	30	25	100	44333,46	21,03
27	30	30	100	39808,19	24,59

Tablo 5.22'de belirtilen çözümleri, aynı yolcu bekleme maliyetine sahip fakat 74 yolculuk araç kapasitesindeki çözümlerle karşılaştıracak olursak; düşük araç kapasiteli çözümlerin amaç değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Otobüs kapasitesi (c) 100 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 10\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.23'te belirtilmektedir.

Tablo 5.23: 100 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (Yolcu)=100 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=10\$ için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
28	20	20	100	55920,28	25,30
29	20	25	100	48406,37	27,13
30	20	30	100	43397,10	21,75
31	25	20	100	55104,22	23,29
32	25	25	100	47849,82	25,55
33	25	30	100	43013,55	21,08
34	30	20	100	54913,63	34,94
35	30	25	100	48125,71	27,13
36	30	30	100	43600,44	21,51

Tablo 5.23'te belirtilen alt problem sonuçları; aynı araç kapasiteli fakat yolcu bekleme maliyetinin 8\$ olduğu durumlarla karşılaştırıldığında; amaç değeri %6-10 oranında daha fazla olmaktadır. Yolcu bekleme maliyetinin sabit ve araç

kapasitesinin 74 yolcu olduğu durumla karşılaştıracak olursak amaç fonksiyonu değerinin, araç kapasitesinin 100 yolcu olduğu alt problemlerin aynı düzeyleri için daha düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Otobüs kapasitesi (c) 150 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 8\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.24'te belirtilmektedir.

Tablo 5.24: 150 yolculuk araç kapasitesi ve 8\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (Yolcu)=150 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=8\$ için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
37	20	20	150	47677,95	20,46
38	20	25	150	40164,04	24,94
39	20	30	150	35154,77	21,00
40	25	20	150	46645,15	25,67
41	25	25	150	39390,75	28,64
42	25	30	150	34554,48	27,64
43	30	20	150	45470,61	32,69
44	30	25	150	38682,70	19,35
45	30	30	150	34157,42	29,31

Tablo 5.24'te belirtilen alt çözümler; aynı yolcu bekleme maliyetine sahip fakat 100 ve 74 yolculuk araç kapasiteli alt problemlerle karşılaştırılmıştır. Araç kapasitesindeki artış aynı seviyedeki alt problemlere göre amaç değerinin daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Otobüs kapasitesi (c) 150 yolcu ve bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti (λ_w) 10\$ olan alt problemlere ilişkin amaç değerleri ve problemin çözüm süreleri Tablo 5.25'te belirtilmektedir.

Tablo 5.25: 150 yolculuk araç kapasitesi ve 10\$ yolcu/saat'lik bekleme maliyeti için çözüm sonuçları

Araç Kapasitesi (c)=150 ve Yolcu Bekleme Maliyeti (λ_w)=10 için Problem Çözümü					
Problem No	Maksimum Rota Uzunluğu (km)	Otobüs İşletim Hızı (km/saat)	Araç Kapasitesi (yolcu)	Amaç Değeri (\$)	Çözüm Süresi (sn)
46	20	20	150	49894,11	37,33
47	20	25	150	42380,21	23,40
48	20	30	150	37370,94	19,00
49	25	20	150	48917,32	24,20
50	25	25	150	41662,91	25,76
51	25	30	150	36826,65	20,20
52	30	20	150	47998,78	27,19
53	30	25	150	41210,86	28,28
54	30	30	150	36685,59	23,53

Bu bölümde farklı veriler ile 54 adet alt problem çözülmüştür. Problem verilerine bağlı olarak amaç fonksiyonunda farklılıklar gözlemlenmiş ve buna bağlı olarak farklı otobüs rota ağ tasarımları ortaya çıkmıştır. Verilen kısıtlamalara bağlı olarak farklı otobüs ağ tasarımları olduğu gibi aynı ağ tasarımları da bulunmuştur.

5.3 Duyarlılık Analizi

Bu bölümde, problemdeki bazı parametrelerin değişiminin problemin amaç fonksiyonu değerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu parametreler başlıca; otobüs kapasitesi, maksimum rota uzunluğu, otobüs işletim hızı, birim otobüs işletme maliyetidir. 16 durak ve 4 istasyon bulunması durumundaki ağ tasarım problemleri için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

5.3.1 Otobüs Kapasitesi ve Maksimum Rota Uzunluğu Değ. Etkisi

Bu aşamada belirtilen verilerin sabit olduğu durumlar için; otobüs kapasitesinin 74, 100 ve 150 yolcu, maksimum rota uzunluğunun ise 20, 25 ve 30 km olduğu durumlarda amaç değeri ve toplam kat edilen mesafenin değişimi gözlemlenmiştir. Yolcu bekleme maliyeti 8\$, ortalama araç hızı 20 km/saat olarak sabit alınmıştır. Araç kapasitesi satırlarda, rota uzunluğu ise sütunlarda olacak şekilde amaç değeri ve toplam kat edilen mesafe Tablo 5.26'da gösterilmiştir.

Tablo 5.26: Otobüs kapasitesi ve rota uzunluğu değişimi etkisi

Rota Uzunluğu		Amaç Değeri			Toplam Kat edilen Mesafe		
		20 km	25 km	30 km	20 km	25 km	30 km
Araç Kapasitesi	74 Yolcu	57779,96	57019,81	57077,60	181,84	175,56	164,27
	100 Yolcu	52596,03	51695,97	51121,38	181,84	175,56	164,27
	150 Yolcu	47677,95	46645,15	45470,61	181,84	175,56	164,27

Tabloya bakıldığında, araç kapasitesinin 74 yolcu olduğu durumda rota uzunluğunun 20 km'den 25 km'ye çıkarıldığında amaç değerinde %1,3 azalma olmaktadır. 25 km'den 30 km'ye çıktığında ise amaç değerinde küçük miktarda artış olmuştur. Rota kapasitesinin sabit olduğu durumlar için araç kapasitesindeki artış amaç değerini azaltmaktadır. Rota uzunluğunun 20 km olduğu durumda; araç kapasitesinin 74 yolcudan 100'e çıkması durumunda amaç değerinde %10'luk bir azalma olmuştur. Araç kapasitesinin 100 yolcudan 150'ye çıkması durumunda da %10'luk bir azalma olmuştur. Rota uzunluğunun sabit ve araç kapasitesinin arttığı durumda toplam kat edilen mesafe sabit kalmaktadır. Araç kapasitesi sabit tutulup rota uzunluğunun arttığı durumda ise toplam kat edilen mesafe sırasıyla %3,5 ve %6,8'lik bir yüzde ile azalmaktadır. Genel değerlendirme olarak bakacak olursak amaç değerinin en düşük olduğu alt çözüm, araç kapasitesinin 150 yolcu ve rota uzunluğunun 30 km olduğu durumdur.

5.3.2 Otobüs İşletim Hızı ve Otobüs İşletim Maliyeti Değ. Etkisi

Bu aşamada belirtilen verilerin sabit olduğu durumlar için; otobüs işletim hızınının 20, 25 ve 30 km/saat, birim otobüs işletme maliyetinin ise 2, 3 ve 4 \$ olduğu durumlarda amaç değeri ve toplam otobüs işletim tutarı değişimi gözlemlenmiştir. Yolcu bekleme maliyeti 8\$, rota uzunluğu 25 km, otobüs kapasitesi 100 yolcu olarak sabit alınmıştır. Otobüs işletim hızı satırlarda, birim otobüs işletme maliyeti ise sütunlarda olacak şekilde amaç değeri ve toplam otobüs işletim tutarı Tablo 5.27'de gösterilmiştir.

Tablo 5.27: Otobüs hızı ve otobüs işletme maliyeti değişimi etkisi

Otobüs İşletim Maliyeti (λ_0)		Amaç Değeri			Toplam Otobüs İşletim Tutarı		
		2 \$/saat	3 \$/saat	4 \$/saat	2 \$/saat	3 \$/saat	4 \$/saat
Otobüs Hızı	20 Km/saat	51189,48	51695,97	52202,46	1012,98	1519,47	2025,96
	25 Km/saat	43935,08	44441,57	44948,06	1012,98	1519,47	2025,96
	30 Km/saat	39098,81	39605,30	40111,80	1012,98	1519,47	2025,96

Tabloya bakıldığında, her durum için otobüs işletme maliyetindeki artış toplam otobüs işletim tutarını arttırmaktadır. Bu artış sırasıyla %50 ve %33 oranında olmuştur. Otobüs işletim hızındaki artış toplam otobüs işletim tutarını etkilememiş ve bu değer sabit kalmıştır. Birim otobüs işletme maliyetindeki artış, bu tutarın amaç değerindeki artışa eşittir. Otobüs işletme maliyetinin sabit olduğu durumda otobüs hızının artışı %16 ve %12'lik bir yüzde ile amaç değerinde bir azalma görülmektedir. Birim otobüs işletme maliyetinin 2\$ ve Otobüs hızının 20 km/saatten 30 km/saate çıkarılması durumunda amaç değeri %30,9 azalmaktayken, 4\$'a çıkarılması durumunda %27'lik bir azalma gözlemlenmektedir. Arada oluşan bu %3'lük fark birim otobüs işletme maliyetindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Amaç değerinin en iyi olduğu alt çözüm, otobüs işletme maliyetinin en düşük olduğu ve otobüs hızının ise en yüksek olduğu durumdur. Otobüs işletme maliyetinin 2\$ ve 4\$ olduğu durumlar için otobüs hızı 30'dan 20 km'ye maliyet artış oranları sırasıyla %30,92 ile %30,14 olarak gerçekleşmektedir. Buradan hareketle birim otobüs işletme maliyetindeki giderek oluşan artış amaç değeri değişim yüzdesini azaltmaktadır.

5.3.3 Otobüs Binme Maliyeti ve Otobüs Bekleme Maliyeti Değ. Etk.

Bu aşamada belirtilen verilerin sabit olduğu durumlar için; birim otobüs binme maliyetinin ise 3, 4 ve 5\$, birim otobüs bekleme maliyetinin 7, 8 ve 9\$ olduğu durumlarda amaç değeri ve toplam kat edilen mesafenin değişimi gözlemlenmiştir. Rota uzunluğu 25 km, otobüs kapasitesi 100 kişi, otobüs işletim hızı 30 km/saat, birim otobüs işletme maliyeti 3\$ olarak sabit alınmıştır. Birim otobüs binme maliyeti satırlarda, birim otobüs bekleme maliyeti ise sütunlarda olacak şekilde amaç değeri ve toplam otobüs işletim tutarı Tablo 5.28'de gösterilmiştir.

Tablo 5.28: Otobüs binme ve otobüs bekleme maliyeti değişimi etkisi

Birim otobüs bekleme maliyeti (λ_w)		Amaç Değeri		
		7 \$/saat	8 \$/saat	9 \$/saat
Birim otobüs binme maliyeti (λ_r)	3 \$/saat	31855,85	33559,97	35264,10
	4 \$/saat	37901,18	39605,30	41309,43
	5 \$/saat	43946,51	45650,64	47354,76

Tabloya bakıldığında soldan sağa ve yukarıdan aşağı doğru inildikçe amaç değerinde artış olmaktadır. Birim otobüs binme maliyetinin 3\$ olduğu ve birim otobüs bekleme maliyetinin 7\$'dan 8\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %5,3; 8\$'dan 9\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %5,1 olmaktadır. Birim otobüs binme maliyetinin 4\$ olduğu ve birim otobüs bekleme maliyetinin 7\$'dan 8\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %4,5; 8\$'dan 9\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %4,3 olmaktadır. Birim otobüs binme maliyetinin 5\$ olduğu ve birim otobüs bekleme maliyetinin 7\$'dan 8\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %3,9; 8\$'dan 9\$'a çıkması durumunda amaç değerinin artış yüzdesi %3,7 olmaktadır. Buradan hareketle birim otobüs binme maliyetinin yüksek olması; birim otobüs bekleme maliyetinde oluşacak değişiklikte amaç değerini daha az seviyede etkilemektedir. Amaç değeri; birim otobüs binme ve birim otobüs bekleme maliyetlerinin en küçük değerlerinde minimum seviyede olmaktadır. Amaç değeri bu alt problemler için en küçük değeri 31855,85\$'dır.

Alt problem çözümleri için toplam otobüs binme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi Tablo 5.29'de verilmektedir.

Tablo 5.29: Toplam otobüs binme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi

Birim otobüs bekleme maliyeti (λ_w)		Yüzde		
		7 \$/saat	8 \$/saat	9 \$/saat
Birim otobüs binme maliyeti (λ_r)	3 \$/saat	57%	54%	51%
	4 \$/saat	64%	61%	59%
	5 \$/saat	69%	66%	64%

Toplam otobüs binme maliyetinin toplam amaç değeri içindeki yüzdesi en düşük %51 ve en yüksek %69 seviyelerinde olmaktadır.

Alt problem çözümleri için toplam otobüs bekleme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi Tablo 5.30'da verilmektedir.

Tablo 5.30: Toplam otobüs bekleme maliyetinin toplam maliyetteki yüzdesi

Birim otobüs bekleme maliyeti (λ_w)		Yüzde		
		7 \$/saat	8 \$/saat	9 \$/saat
Birim otobüs binme maliyeti (λ_r)	3 \$/saat	37%	41%	43%
	4 \$/saat	31%	34%	37%
	5 \$/saat	27%	30%	32%

Toplam otobüs bekleme maliyetinin toplam amaç değeri içindeki yüzdesi en düşük %27 ve en yüksek %43 seviyelerinde olmaktadır.

İki maliyet değerinin aynı seviyesi düşünüldüğünde; birim otobüs binme maliyetinde %57'den %64'e yükselme olmaktadır; birim otobüs binme maliyetinde %37'den %32'ye bir azalma olmaktadır.

Bu aşamada birim otobüs binme maliyetinin artışı, birim otobüs bekleme maliyetindeki artışa göre amaç değerini daha fazla etkilemektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Artan nüfus ve gelişen şehirleşme ile birlikte bir yerden bir yere gitmek ulaşımın doğru tasarlanamamasından dolayı daha uzun sürmeye başlamıştır. Bunun sonucunda ulaşım aracı kullanımını artmaktadır. Bir tarafta hizmet alıcılar bulunmakta iken diğer tarafta da hizmet sağlayıcılar bulunmaktadır. Amaç, hizmet kullanıcıları ulaşmak istedikleri noktaya en kısa sürede, kaliteli bir şekilde ve hizmet sağlayıcı açısından en az maliyetli olacak şekilde ulaştırmaktır.

Bu çalışmada değinilen alan şehir içi ulaşımıdır. Yolcuların duraklardan alınıp gitmek istedikleri noktalara kısa sürede ulaşmasını sağlamaktır. Hizmet kalitesini etkileyen etmenler bulunmaktadır. Bunlar yolcuların durakta bekleme süresi, gelen aracın doluluk oranı, hizmet sağlayıcı aracın istenilen noktaya varış süresi ve hizmetin maliyeti bunlar arasındadır. Diğer taraftan hizmeti sağlayan tarafından belirli yükümlülükler ve sorumluluklar vardır. Bunlar ise; yolcuların hızlı şekilde istedikleri noktaya ulaşmaları, araç doluluk oranlarının optimum olması, araç periyotlarının belirlenmesi ve hizmetin getirdiği maliyet.

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu dört bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, raylı sistem maliyeti, otobüs işletme maliyeti, yolcuların otobüs binme maliyeti ve yolcuların otobüs bekleme maliyetidir. Bunları etkileyen bileşenler ise; saat başına maksimum mevcut koltuk, otobüs kapasitesi, maksimum rota uzunluğu, ortalama otobüs işletim hızı, birim otobüs işletme maliyeti, bir yolcunun saatlik biniş maliyeti, bir yolcunun saatlik bekleme maliyeti, istasyondan çıkan raylı sistem aracının bekleme ve sürüş süresi maliyeti, servis frekansı olmaktadır.

ÇDA_ ARP için önerilen model üzerinden vaka çalışmaları ve alt test problemleri oluşturulmuş ve bunların çözümleri incelenmiştir. Problem Np-Zor sınıfında olduğundan dolayı modeldeki depo ve istasyon sayısı toplamda 20 adet ile sınırlandırılmış ve daha kısa sürelerde çözüme ulaşmak amaçlanmıştır.

Model içerisinde etkin olan 3 farklı maksimum rota uzunluğu, 3 farklı ortalama araç hızı, 3 farklı araç kapasitesi ve 2 farklı birim yolcu bekleme maliyeti

için toplamda 54 adet alt problem çözülmüştür. Çözüm sonuçları, amaç değerleri için incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Amaç değeri için etkili sayılabilecek girdilerin değişiminin ikili karşılaştırması yapılmıştır. Otobüs kapasitesi ile maksimum rota uzunluğu değişimi, otobüs işletim hızı ile otobüs işletme maliyeti değişimi, otobüs binme maliyeti ile otobüs bekleme maliyeti değişiminin ikili olarak farklı değerler altındaki amaç fonksiyonunda yaratmış olduğu etkiler incelenmiştir. Her ikili değişimin amaç değerindeki etkisi matris olarak değerlendirilmiş ve yüzdesel farklılıkları ortaya koyulmuştur. İkili değişimlerin amaç değeri üzerindeki etkileri kademe bazlı olarak incelenmiş ve amaç değerinin en küçük değer aldığı ikililer belirlenmiştir. Otobüs kapasitesinin değişimi, maksimum rota uzunluğundaki değişime göre amaç değeri üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Otobüs işletim hızının değişimi, otobüs işletim maliyetindeki değişime göre amaç değeri üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Otobüs binme maliyetindeki değişim, otobüs bekleme maliyetindeki değişime göre amaç değeri üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yapılmış olan bu çalışma, ÇDA_ARP için vakalar üzerinde olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. 16 durak ve 4 istasyon için Besleyici Otobüs Ağ Tasarım Problemini kapsamında raylı sistem istasyonlarına duraklardan otobüs hatları ile yolcuların taşınmasını içermektedir. Bu kapsamda toplamda 20 adet düğüm noktası için ağ tasarım sonuçlarına ulaşılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında oluşturulan bu matematiksel model, gerçek hayatta ağ tasarımının asıl uygulayıcılarına yol gösterici niteliktedir. Model, daha fazla sayıda durak ve istasyon noktası için uygulanabilirliği mümkündür.

Problemin içerdiği kısıtların ve amaç fonksiyonunun zorluğu, veriler arttıkça problemin çözüm süresinin artması göz önüne alındığında BOAT problemine gerçek hayat koşullarında bir çözüm getirebilmek için ilgili problem sezgisel yöntemlerle çalışılmalıdır.

Durakların kapasitesine bağlı olarak rotalara atanacak otobüs özellikleri değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda heterojen filolu otobüslerle çalışma yapılabilir. Trafik yoğunluğuna göre ortalama otobüs işletim

hızının değişken olması, araç özelliğine göre otobüs işletim maliyetinin değişken olması gibi gerçek hayatta yaşanan kısıtlamalar modele dahil edilmesiyle çalışmanın kapsamı genişletilebilir.

Literatür inceleme bölümünde ayrıntılı olarak verildiği gibi, henüz tam olarak tüm kısıtları üzerinde çalışılmamış olan BOAT problemi hakkında yapılan ve bütünleşik matematiksel model sunan bu tez çalışmasının, problemin derinlemesine çalışılmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

7. KAYNAKLAR

Agrawal, V., Lightner, C., Lightner-Laws, C. and Wagner, L., “A bi-criteria evolutionary algorithm for a constrained multi-depot vehicle routing problem”, *Methodologies and Application 21*, (17), 5159–5178, (2016).

Alinaghian, M. and Shokouhi, N., “Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search”, *Omega*, 76, 85-99, (2018).

Almasi, M.H., Mounes, S.M., Koting, S. and Karim, M.R., “Analysis of Feeder Bus Network Design and Scheduling Problems”, *The ScientificWorld Journal*, Doi: /10.1155/2014/408473, (2014).

Azadeh, A. and Farrokhi-Asl H., “The close–open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles”, *Transportation Letters*, 78-92, (2017).

Baker, B.M. and Ayechev, M.A., “A genetic algorithm for the vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research 30*, 787–800, (2003).

Baldacci, D., Christofides, N. and Mingozzi, A., “An Exact Algorithm for The Vehicle Routing Problem Based on the Set Partitioning Formulation with Additional Cuts”, *Mathematical Programming Ser. A 115*, 351–385, (2008).

Bell, J.E. and McMullen, P.R., “Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem”, *Advanced Engineering Informatics*, 18, 41-48, (2004).

Bowerman, R. ; Hall, B. and Calomai, P., “A multi-objective Optimization Approach to Urban School Bus Routing: Formulation and Solution Method”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 29(2), 107-123, (1995).

Brandao, J., “A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552-564, (2004).

Bräysy, O., “A Reactive Variable Neighborhood Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Infoms Journal on Computing*, 15(4), 347-368, (2003).

Brito, J., Expósito, A. and Moreno J.A., “Variable neighbourhood search for close–open vehicle routing problem with time windows”, *IMA Journal of Management Mathematics*, 1-14, (2013).

Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P., “Exact Algorithms for The Vehicle Routing Problem, Based on Spanning Tree And Shortest Path Relaxations”, *Mathematical Programming*, 255-282, (1981).

Cordeau J., Gendreau M., Laporte G. “A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems.” *Networks* 30, 105–119, (1997)

Ciaffi, F., Cipriani, E. And Petrelli, M., “Feeder bus network design problem: a new metaheuristic procedure and real size applications”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 798 – 807, (2012).

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

Deng, L., Gao, W. Zhou, W. and Lai, T., “Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2383 – 2394, (2013).

Doerner,K.F., Gronaltb, M., Hartla, R.F., Kiechlec, G., and Reimannnd, M., “Exact and heuristic algorithms for the vehicle routing problem with multiple interdependent time Windows”, *Computers & Operations Research* 35, 3034–3048, (2008).

Erbao, C. and Mingyong, L., “The open vehicle routing problem with fuzzy demands”, *Expert Systems with Applications*, 37, 2405 – 2411, (2010).

Erbao, C., Mingyong, L. and Hongming, Y., “Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies”, *Expert Systems with Applications*, 41, 3569–3575, (2014).

Eryavuz, M. ve Gencer, C., “Araç rotalama problemine ait bir uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, Isparta, (2001).

Fleszar K., Osman I. H. and Hindi K. S., “A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 195, 803–809, (2009).

Fu, Z., Eglese, R. and Li, L., “A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem”, *Journal of the Operational Research Society*, 56, 267–274, (2005).

Fukasawa, R., Lysgaard, J., Poggi de Aragao, M., R. Marcelo, Uchoa, E. and Werneck, R. F., “Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Mathematical Programming*, 106(3), 491-511 (2006).

Hadjiconstantinou, E. and Christofides, N.,” A new exact algorithm for the vehicle routing problem based on q-paths and k-shortest paths relaxations”, *Annals of Operations Research* 61, 21-43, (1995).

Hansen, P. and Mladenovic, N., “Variable neighborhood search for the p-median”, *Location Science*, 4(5), 207-226, (1997).

Hemmelmayr, V.C., Doerner, K.F. and Hartl, R.F. , “A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems”, *European Journal of Operational Research*, 195, 791-802, (2009).

Jia-li, L. and Zu-jun, M., “Multi-depot open vehicle routing problem with time windows based on vehicle leasing and sharing”, *Systems Engineering — Theory & Practice*, 33(3), (2013).

Keskintürk, T., Topuk, N. ve Özyeşil, O., “Araç Rotalama Problemleri ile Çözüm Yöntemlerinin Sınıflandırılması ve Bir Uygulama”, *İşletme Bilimi Dergisi*, 3(2), (2015).

Kuah, K. and Perl, J., “The Feeder-Bus Network-Design Problem”, *The Journal of the Operational Research Society*, 40(8), 751-767, (1989)

Kuan, S.N., Ong, H.L., Ng, K.M., “Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization”, *Advances in Engineering Software*, 37, 351-359, (2006).

Kytöjokia, J., Nuortio, T., Bräysy, O. and Gendreau, M., “An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems”, *Computers & Operations Research*, 34, 2743–2757, (2007).

Lahyani, R., Gouguenheim, A.L. and Coelho, L.C., “A hybrid adaptive large neighbourhood search for multi-depot open vehicle routing problems”, *International Journal of Production Research*, 6963-6976, (2019).

Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C., Taheripour, S. and Voß, S., “An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem”, *Regular Article*, 38(1), 1-13, (2015).

Laporte G., Nobert Y. and Desrochers, M., “Optimal Routing under Capacity and Distance Restrictions”, *Operations Research*, 33, 1050-1073, (1985).

Laporte, G., “The Vehicle-Routing Problem - an Overview of Exact and Approximate Algorithms”, *European Journal of Operational Research*, 59 (3), 345-358, (1992).

Laporte, G., Gendreaub, M., Potvinb, J.Y., and Semet, F., “Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem”, *International Transactions in Operational Research*, 7, 285-300, (2000).

Laporte, G., Nobert, Y. and Taillefer, S., “A Branch-And-Bound Algorithm for the Asymmetrical Distance-Constrained Vehicle Routing Problem”, *Mathl Modelling*, 9(12), 857-868 (1987).

Li, F., Golden, B. and Wasil, E., “The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results”, *Computers & Operations Research*, 34, 2918–2930, (2007).

Liu, R., Jiang, Z. and Geng, N., “A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem”, *Regular Article*, 36(2), 401-421, (2012).

Martins, C.L. and Pato, M.V., “Search strategies for the feeder bus network design problem”, *European Journal of Operational Research*, 106, 425 -440, (1998).

Mohaymany, A.S. and Gholami, A., “Multimodal Feeder Network Design Problem: Ant Colony Optimization Approach”, *Journal Of Transportation Engineering*, 323-331, (2010).

Norouzi, N. Moghaddam, R. T., Salamatbakhsh, A. and Alinaghian, M., “Solving a novel bi-objective open vehicle routing problem in a competitive situation by multiobjective particle swarm optimization”, *Journal of Applied Operational Research*, 15-29, (2009).

Oturakçı, M. ve Uyan, I., “Optimization Of a Vehicle Routing Problem in a Logistics Company in Turkey”, *Alphanumeric Journal*, 2(2), (2014).

Pichka, Kh., Ashjari, B., Ziaefar, A. and Nickbeen, P., “Open Vehicle Routing Problem Optimization under Realistic Assumptions”, *Int. J. Research in Industrial Engineering*, 3(2), 46-55, (2014).

Polacek, M., Hartl R.F. and Doerner K., “A Variable Neighborhood Search for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Journal of Heuristics*, 10, 613–627, (2004).

Ralphs, T.K., Kopman, L., Pulleyblank, W.R. and Trotter, L.E., “On the Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Mathematical Programming Ser. B* 94, 343–359, (2003).

Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., and Barbosa-Póvoa, A. P., “Planning waste cooking oil collection systems”, *Waste Management*, 33(8), 1691–1703, (2013).

Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., Braysy O., Ioannou G., “A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem”, *Computers and Operations Research*, 37 (3): 443-455 (2010).

Sánchez-Oro J., López-Sánchez, A.D. and Colmenar, J.M., “A general variable neighborhood search for solving the multi-objective open vehicle routing problem”, *J Heuristics*, 1-30, (2017).

Sariklis, D. and Powell, S., “A heuristic method for the open vehicle routing problem”, *Journal of the Operational Research Society*, 51, 564-573, (2000).

Savelsbergh, M. W. P. and Sol, M., “The General Pick-up and Delivery Problem”, *Transportation Science* 29, 17-29, (1995).

Shen, L., Tao, F. and Wang, S., “Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Carbon Trading”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, doi:10.3390/ijerph15092025, (2018).

Soto, M., Sevaux, M., Reinholz, A. and Rossi, A., “Multiple neighborhood search, tabu search and ejection chains for the multi-depot open vehicle routing problem”, *Computers & Industrial Engineering*, 211-222, (2017).

Şevkli, A.Z. and Güler, B., “A Multi-Phase Oscillated Variable Neighbourhood Search Algorithm for a Real-World Open Vehicle Routing Problem”, *Applied Soft Computing Journal*, 128-144, (2017).

Tansini L., Urquhart M. and Viera O., “Comparing Assignment Algorithms for the Multi - Depot VRP”, Internet: <https://www.researchgate.net/publication/2416037>, (2002).

Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T., “Distribution of fresh meat”, *Journal of Food Engineering*, 51: 85–91 (2002).

Toro, E.M., Franco, J.F., Echeverri, M.G., Guimarães, F.G. and Rendón, R.A.G., “Green open location-routing problem considering economic and environmental costs”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*”, 8, 203-216, (2017).

Toth, P. and Vigo, D., “Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem”, *Discrete Applied Mathematics*, 123, 487–512, (2002).

Xu, Y., Wang, L. and Yang Y., “A New Variable Neighborhood Search Algorithm for the Multi Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 289-296, (2012).

Yu, S., Ding, C. and Zhu, K., “A hybrid GA-TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material”, *Expert Systems with Applications*, 38, 10568-10573, (2011).

Yu, V.F., Jewpanya, P., and Perwira Redi, A.A.N., “Open Vehicle Routing Problem with Cross-Docking”, *Computers & Industrial Engineering*, 94, 6-17, (2016).

Zhang, L. and Wang, M., “Study on a Multi-Depot and Heterogeneous-Vehicle Open Vehicle Routing Problem to Reduce Fuel Consumption”, *Applied Mechanics and Materials*, 336, 2567-2571, (2013).

EKLER

8. EKLER

EK A. Dügüm Koordinatları

Tablo A.1: Otobüs durakları koordinatları (Kuah ve Perl 1989)

Otobüs Durak no	X Koordinatı*	Y Koordinatı*
1	30	234
2	62	235
3	119	250
4	182	249
5	134	228
6	163	230
7	115	222
8	87	215
9	24	203
10	60	193
11	125	197
12	150	210
13	183	196
14	108	186
15	85	177
16	37	169
17	130	173
18	185	164
19	12	163
20	67	153
21	105	157
22	123	152
23	32	133
24	55	135
25	73	135
26	89	144
27	142	137
28	161	143
29	18	107
30	46	107
31	107	115
32	147	117
33	172	124
34	31	95
35	91	103

Tablo A.1: Otobüs durakları koordinatları (Kuah ve Perl 1989) (devamı)

36	113	99
37	13	80
38	66	87
39	83	83
40	141	92
41	167	97
42	67	65
43	122	75
44	150	67
45	177	68
46	95	59
47	17	47
48	47	43
49	130	48
50	71	35
51	108	33
52	169	35
53	13	25
54	35	17
55	63	7

* Uzaklıklar 100 km cinsinden belirtilir.

Tablo A.2: İstasyon noktaları koordinatları (Kuah ve Perl 1989)

İstasyon Durak No	X Koordinatı*	Y Koordinatı*
56	42	72
57	78	116
58	123	137
59	160	178

* Uzaklıklar 100 km cinsinden belirtilir.

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Deniz Görkem ÖZEN

Doğum Yeri ve Tarihi : 03.11.1991, DENİZLİ

Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

Elektronik posta : d.g.ozen@hotmail.com

İletişim Adresi : Cumhuriyet Mah. 211 Sokak No:26/1
Nazilli/AYDIN

Yayın Listesi :

- Kuruca, H.İ., Kaya, Ü. ve Özen, D.G., “Otomatik Paketleme Sisteminin Arıza/Tamir Bakım İşlemlerinde Verimlilik ve Tampon Stok Seviyesi Belirlenmesi”, 18. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik Sempozyumu, (2017) DOI: 10.18092/ulikidince.348131