

Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi İçin Çevreci Rotalama

Buse Kasımbeyli

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2016

Pollution Routing for Vehicle Routing Problem With Backhauls

Buse Kasimbeyli

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

June 2016

Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi İçin Çevreci Rotalama

Buse Kasımbeyli

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Buse Kasımbeyli'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi İçin Çevreci Rotalama” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK

Üye : Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

Üye : Doç. Dr. Özden ÜSTÜN

Üye : -

Üye : -

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK danışmanlığında hazırlamış olduğum “Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi İçin Çevreci Rotalama” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 06/06/2015

Buse Kasimbeyli

İmza

ÖZET

Kapasiteli araç rotalama probleminin bir türü olan önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi (ÖDST-ARP), müşterilerin dağıtım ve toplama yapılacak müşteriler olmak üzere iki gruba ayrıldığı problem türüdür. Depodan çıkan bir araç dağıtım yapılacak müşterileri ziyaret ettikten sonra toplama yapılacak müşterileri ziyaret eder ve depoya geri döner. Rotalama faaliyetlerinin dağıtım ve toplama yapılacak müşteriler şeklinde ayrı ayrı ele alındığı rotalama problemleri, kaynakların verimli kullanılmasına olanak sağlayarak, lojistik maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Günümüzde şirketlerin maliyet azaltıcı politikalara ek olarak çevreci politikalar izlemesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada, yakıt tüketimini göz önünde bulunduran çevreci rotalama (pollution routing) anlayışıyla ÖDST-ARP'nin çözümü hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilgili problem için karma tamsayılı bir model önerilmiştir. Problem, NP-zor sınıfta yer aldığı için GAMS yazılımı CPLEX çözücüsü büyük boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kalmıştır. Büyük boyutlu problemlerde makul sürelerde sonuç elde edebilmek amacıyla metasezgisel algoritmalarından tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın etkinliği literatürde yer alan test problemleri üzerinde test edilmiş, bazı test problemleri için bilinen eniyi değerlere ulaşılabildiği görülmüştür. Çevreci rotalama yaklaşımı ile edilen rotalar ve maliyetler, klasik önce dağıt sonra topla araç rotalama probleminin çözümü ile elde edilen değerler ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Son olarak toplam seyahat mesafesine bağlı maliyet ve toplam yakıt tüketimi amaçları ağırlıklı toplam skalerleştirme yardımıyla birleştirilmiş ve aralarında oluşabilecek ödünleşmeler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi, Çevreci Rotalama, Tavlama Benzetimi

SUMMARY

In this thesis, an extension of the Capacitated Vehicle Routing Problem (VRP), known as the Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB), is considered. The set of customers are divided into two subsets: linehaul and backhaul customers. A vehicle that starts the route from depot visits linehaul customers, then visits backhaul customers and finally return to depot. Such kind of vehicle routing problems, where customers are divided into two subsets, allow utilization of the resources more efficiently and thus serve to be reduced logistics costs.

Nowadays in transportation problems, besides the routing cost minimization policies, companies are expected to consider minimization of hazardous effects of transportation on the environment. In this work, a solution of the vehicle routing problem with backhauls considering cost of fuel consumption with pollution routing approach is aimed. A mixed integer mathematical model for the pollution vehicle routing problem with backhauls is proposed. Because of the NP-hardness, larger problems could not be solved by GAMS solvers. Therefore, for larger problems, the simulated annealing solution approach that allowing obtaining results more rapidly is used. The solution approach is demonstrated on test problems from the literature and for some problems, is shown to reach the best solutions that are given in the literature. The results obtained in the scope of the pollution routing approach have been compared with the results of the classic vehicle routing problem with backhauls. Finally the aim of depend on total travel distance cost and total fuel consumption cost are combined by weighted sum scalarization method and potential tradeoffs are analyzed.

Keywords: Vehicle Routing Problem With Backhaul, Pollution Routing, Simulated Annealing

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, desteğini esirgemeyip bilgi ve deneyimleriyle ile bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. İnci SARIÇİÇEK'e, katkılarından dolayı Arş. Gör. Sinem BOZKURT'a, hayatım boyunca her zaman yanımda olan aileme, bu zorlu sürecin her aşamasında bana destek olan canım eşim Orhan KASIMBEYLİ'ye, beni herşeyi başarabileceğime inandıran canım oğlum Mert KASIMBEYLİ'ye teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. ROTALAMA PROBLEMLERİ	16
3.1. Serim Kuramı.....	16
3.2. Rotalama Problemlerinin Sınıflandırılması	17
3.3. Araç Rotalama Problemi ve Türleri.....	19
4. ÖNCE DAĞIT SONRA TOPLA ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN	
ÇEVRECİ ROTALAMA YAKLAŞIMI	23
4.1. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi.....	23
4.2. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemine Ait Matematiksel Modeller ..	24
4.3. Çevreci Rotalama ve Yasal Zorunluluklar.....	30
4.4. Çevreci Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi	33
4.4.1. Matematiksel model	39
4.4.2. Boyut analizi	46
4.4.3. Küçük boyutlu test problemlerinin çözümü	48
5. ÇEVRECİ ÖNCE DAĞIT SONRA TOPLA ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN	
TAVLAMA BENZETİMİ İLE ÇÖZÜMÜ	49
5.1.Tavlama Benzetimi	49
5.2. Kullanılan Algoritma ve Çözümlerin Üretilmesi.....	55
5.3. Problem Çözümü İçin Geliştirilen Program	55
5.4. Test Problemlerine İlişkin Sayısal Sonuçlar	59
5.4.1. Toplam yakıt tüketiminin enküçüklenmesine ilişkin sonuçlar.....	60
5.4.2. Amaçlara ilişkin ödünleşmeler.....	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	76

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

KAYNAKLAR DİZİNİ.....	78
Ek Açıklamalar-A.....	83
Ek Açıklamalar-B.....	84



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3. 1. Yönsüz (G), Yönlü (D) ve Karma serim örneği	16
3. 2. a) Düzgün on iki yüzlü, b) Karşı gelen uygun bir Hamilton turu.....	18
3. 3. a) Köningsberg köprüleri, b) Köningsberg köprülerinin serim gösterimi	18
4. 1. Araç ağırlığının birim yakıt miktarı başına gidilen mesafeye etkisi	34
4. 2. Kesikli noktaların tahmini değerleri	35
4. 3. Önerilen bağlantı yoluyla elde edilen değerlerin gerçek veriler ile karşılaştırılması....	35
4. 4. Örnek probleme ilişkin rotalar.....	38
5. 1. Tavlama benzetimine ait pseudo kod	52
5. 2. Mevcut çözüm (a) ve komşu çözüm (b)gösterimi	54
5. 3. Geliştirilen programa ait arayüz	55
5. 4. Problem veri giriş sayfası	56
5. 5. Tavlama benzetimi veri girişi sayfası.....	56
5. 6. Müşteri koordinat ve talep verileri girişi	57
5. 7. Programa ilişkin çözüm ekranı	58
5. 8. Sonuçların dosyaya yazdırılması	59
5. 9. A1 test problemi müşterilerinin koordinat düzleminde yeri.....	63
5. 10. A1 test problemine ait rotalar	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2. 1. ÖDST-ARP ve çözüm yöntemleri.....	5
2. 2. Çevreci rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri	10
4. 1. Üç müşterili örnek problem.....	38
4. 2. Örnek probleme ait hesapsal sonuçlar	39
4. 3. Matematiksel modele ilişkin boyut analizi.....	47
4. 4. Küçük boyutlu test problemleri	48
5. 1. A1 test problemi için bulunan çözüm.....	59
5. 2. Toplam seyahat mesafesini (Z_1) enküçükleyen model için test problemlerinin sonuçları	61
5. 3. Yakıt tüketim maliyetini-FCC (Z_2) enküçükleyen model için test problemlerinin sonuçları	64
5. 4. Amaç fonksiyonlarının karşılaştırmalı sonuçları.....	66
5. 5. Ağırlıklı toplam skalerleştirme ile elde edilen sonuçlar	73
5. 6. Ödönleşmelere ilişkin sonuçlar	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ARP	Araç Rotalama Problemi
AKARP	Asimetrik Klasik Araç Rotalama Problemi
ÇPP	Çinli Postacı Problemi
FCR	Yakıt Tüketim Oranı (Fuel Consumption Rate)
FCC	Yakıt Tüketim Maliyeti (Fuel Consumption Cost)
GSP	Gezgin Satıcı Problemi
KARP	Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
ÖDST-ARP	Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi
SKARP	Simetrik Klasik Araç Rotalama Problemi
TB	Tavlama Benzetimi

1.GİRİŞ

Firmaların ayakta kalabilmeleri ve rekabet halinde olabilmeleri için kaliteli ürünleri düşük maliyetle üretmeleri gerekmektedir. Dağıtım maliyeti, ürünün toplam maliyetinin %20'sini oluşturmaktadır. Bu maliyet, hem ürünün tedarik zinciri ile hem de ürünün son müşteriye olan dağıtım zinciri ile ilişkilidir (Reimann vd., 2004). Danzig ve Ramser (1959) tarafından ortaya atılan araç rotalama problemi (ARP), araç kapasite kısıtını dikkate alarak ürünlerin tüm müşterilere dağıtılacağı en küçük toplam seyahat mesafesini verecek rotaların oluşturulmasıdır. Bir araç depodan dolu olarak çıkar, müşterileri ziyaret ettikten sonra tekrar depoya geri döner ve her müşteri yalnızca ve mutlaka bir araç tarafından ziyaret edilir. Yapılacak başarılı rotalama işlemleri ile firmaların zaman ve maliyetten tasarruf sağlaması mümkündür.

Araç rotalama problemlerinin yaygın olarak kullanılan ve en bilinen amacı toplam seyahat mesafesinin en küçüklenmesidir. Literatürde ARP için çözüm aranırken hizmet verecek araç sayısını en küçüklemek, araç çeşidini en küçüklemek, toplam gecikmeyi en küçüklemek, taşıma işlemi için gerekli zamanı en küçüklemek gibi birçok farklı amaç ele alınmıştır. Sözkonusu amaçların her biri işletmelerin kârlılık amacına hizmet etmektedir. Ancak günümüzde ARP için çözüm aranırken yalnızca kârlılık amacına uygun çözümler bulmak yeterli değildir.

Sanayileşme ve kentleşmenin artmasıyla çevresel sorunların artması ve doğal kaynakların hızla tükenmesi hem bireyler hem de hükümetler üzerinde tedbir alınması yönünde baskı oluşturmaktadır. İklim değişikliği ve beraberinde ortaya çıkan riskleri yöneten ve azaltan işletmeler, işletme yaşamının devam ettirilmesine ilişkin yeni fikirler ararken, karbon-zorunlu gelecekte rekabet avantajı sağlayacaktır (Lash ve Wellington, 2007).

Literatür incelendiğinde çevresel faktörleri dikkate alan üç çalışma göze çarpmaktadır. Bektaş ve Laporte (2011), literatüre Çevreci Rotalama Problemini (Pollution Routing Problem) tanıtmış ve klasik araç rotalama probleminden farklı olarak, sera gazı salınımı, seyahat süreleri, yakıt miktarı ve onların maliyetlerini içeren daha geniş ve

kapsamlı bir amaç fonksiyonu sunmuştur. Xiao vd. (2012), yakıt tüketimini enküçüklemek amacıyla yakıt tüketim oranı adı verilen, araç yüküne bağlı bir faktörü kapasiteli araç rotalama problemine ilave etmiştir. Demir vd. (2014), çevreci rotalama problemine iki amaçlı olarak değerlendirmiştir. Birinci amaç fonksiyonu toplam seyahat süresinin enküçüklenmesi iken, ikinci amaç fonksiyonu ise genişletilmiş salınım modellerine dayanan yakıt tüketiminin enküçüklenmesidir. Yapılan çalışmalarda genellikle klasik ARP incelenmiştir. Çevresel faktörlerin değerlendirilmesinde ise yakıt tüketiminin CO₂ salınımına olan etkisi üzerinde durulmuştur. ARP'nin türlerine bakıldığında Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Probleminin (Vehicle Routing Problem With Backhauls, ÖDST-ARP) yüke bağlı CO₂ salınımının dikkate alınarak araçların rotalanmasında ele alınması gereken türlerden olduğu açıktır. Erişilebilen literatürde önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi (vehicle routing problem with backhauls, ÖDST-ARP)'ne ilişkin çevresel faktörleri içeren bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Çalışmada ÖDST-ARP araç yükü ve yola bağlı CO₂ salınımını dikkate alan bir bakış açısıyla ele alınmıştır. ÖDST-ARP araç kapasitesi dikkate alınarak öncelikle dağıtım yapılacak müşterileri ziyaret eden, dağıtım işlemi bittikten sonra toplama yapılacak müşterileri ziyaret ederek depoya geri dönen rotaların belirlenmesi problemidir. Rotaların belirlenmesinde amaç genellikle toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesidir. Rotalama işleminde dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin ayrı ayrı ele alınması kaynakların etkin şekilde kullanılmasına olanak sağladığı için lojistik yöneticilerinin dikkatini çekmektedir.

Çalışmada ÖDST-ARP incelenirken iki farklı amaç fonksiyonu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş olup bunlardan ilki toplam seyahat mesafesi, ikincisi ise çevresel faktörleri içeren toplam yakıt tüketimi maliyetinin enküçüklenmesidir. Toplam yakıt tüketimi maliyetinin hesaplanmasında Xiao vd. (2012) tarafından klasik ARP için geliştirilen amaç fonksiyonundan faydalanılmıştır. Probleme ait karma tamsayılı metamatiksel modelin oluşturulmasında literatüre Goetschalckx ve Jacobs-Blecha (1989) tarafından sunulan matematiksel modelden faydalanılmış olup, bazı kısıtlarda değişikliğe gidilmiştir. Matematiksel modelin çözümünde GAMS yazılımının CPLEX 9.0 çözücüsü kullanılmıştır. Ancak ÖDST-ARP'nin NP-zor yapıya sahip olması sebebiyle kesin çözüm veren yöntemlerin büyük boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sebeple büyük boyutlu problemlerin çözümüne olanak sağlanması amacıyla tavlama benzetimi algoritması kullanılmış ve C# programlama dilinde kodlanmıştır. İlgili

problemleri çözmek için geliştirilen programın etkinliği literatürden alınan test problemleri üzerinde değerlendirilmiştir.

Toplam seyahat mesafesi ve toplam yakıt tüketimi maliyetinin enküçüklenmesi amaçlarının ayrı ayrı değerlendirilmesinden sonra sözkonusu amaç fonksiyonlarının birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayacak değişiklikler yapılmıştır. Ardından amaçlar ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile birleştirilmiş ve ödünleşmeler incelenmiştir. Yapılan çalışma bu özelliğiyle de literatüre katkı sağlayacak niteliktedir.

Çalışmanın birinci bölümünde giriş, ikinci bölümünde literatür taraması kapsamında yapılan incelemeler yer almaktadır. Üçüncü bölümde rotalama problemlerinin genel olarak incelenmesinin ardından ARP ve ARP'nin türleri kısaca tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde ARP'nin bir türü olan ÖDST-ARP detaylı olarak incelenmiş ve çevreci rotalama yaklaşımıyla bir model önerilmiştir. Beşinci bölümde toplam seyahat mesafesini enküçükleme ve toplam yakıt tüketimi maliyetini enküçükleme amaçları için ayrı ayrı çözüm aranmış ve çözümler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Amaçların ayrı ayrı ele alınmasının ardından skalerleştirme yapılarak amaçlar birleştirilmiş ve elde edilen çözümler değerlendirilmiştir. Altıncı ve son bölümde ise çalışmayla ilgili sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatüre 1959 yılında Dantzing ve Ramser (1959) tarafından kazandırılan Araç Rotalama Problemi, çözümü oldukça zor bir kombinatoriyel (combinatorial) eniyileme problemidir. ARP'nin çok sayıda alt türü bulunmaktadır. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi, ARP'nin yaygın olarak kullanılan türlerden biridir. ÖDST-ARP dağıtım ve toplama yapılacak noktaların olduğu problemlerdir. Dağıtım yapılacak noktalar için tek merkezden (depo) çıkış, toplama yapılacak noktalar için ise tek merkeze dönüş söz konusudur. Literatür incelendiğinde özellikle son yıllarda ÖDST-ARP alanında yapılan çalışmalarda artış olduğu görülmüştür. Tez kapsamında incelenen ÖDST-ARP ve çözüm yöntemleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Erişilebilen literatür incelendiğinde ÖDST-ARP'nin ilk defa 1980'li yıllarda ortaya atıldığı ve üzerinde sezgisel ve kesin çözüm yöntemlerine dayalı birçok çalışma yapıldığı görülmektedir (Deif ve Bodin, 1984). Problemin çözümü için Clarke ve Wright Tasarruf Yöntemine dayanan bir sezgisel geliştirmiştir. ÖDST-ARP için geliştirilen ilk kesin çözüm veren algoritma ise Yano'nun perakendeciler zincirinde uyguladığı Dal-Sınır algoritmasıdır (Yano vd., 1987). Problemde her bir aracın gideceği müşteri sayısına her bir tür için belirli bir sınır koyulmuştur.

Goetschalckx ve Jacobs-Blecha (1989), Fisher ve Jaikumar'ın ARP için önerdiği modelin genişletilmiş bir halini ÖDST-ARP için kullanmış ve iki aşamalı çözüm yöntemini önermiştir. İlk aşamada müşterilerin kümelenmesi Genel Atama Problemi olarak ele alınmıştır. İkinci aşamada problem Gezgin Satıcı Problemi olarak değerlendirilerek müşteriler için eniyi rotalar bulunmaya çalışılmıştır.

Toth ve Vigo (1997), simetrik ve asimetric uzaklık matrisine sahip ÖDST-ARP için yeni bir tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modeli Lagrange alt sınır değerini bulmak için kullanmış ve ardından eniyi çözümü bulmak için dal sınır algoritması önerilmiştir.

Çizelge 2.1. ÖDST-ARP ve çözüm yöntemleri

Yazarlar	Yıl	Yaklaşım
Deif ve Bodin	1984	Tasarruf Algoritması (Savings Algorithm)
Yano vd.	1987	Dal Sınır Algoritması (Branch and Bound Algorithm)
Goetschalckx ve Jacobs-Blecha	1989	İki Aşamalı Sezgisel (Two-stage Heuristic)
Toth ve Vigo	1997	Dal Sınır Algoritması
Mingozzi ve Giorgi	1999	D Sezgiseli
Toth ve Vigo	1999	Kümeleme Yaklaşımına Dayanan TV Sezgiseli
Wade ve Salhi	2002	Ekleme Tipi Sezgiseli (An Insertion-type Heuristic)
Ropke ve Pisinger	2006	Geniş Komşuluk Arama (Large Neighborhood Search)
Tavakkoli- Moghaddam vd.	2006	Memetik Algoritma
Brandão	2006	Yasaklı Arama
Wang ve Wang	2006	İki Aşamalı Sezgisel
Tütüncü vd.	2009	Aç Gözlü Rassal Adaptif Hafıza Programı Araması
Gajpal ve Abad	2009	Karınca Kolonisi Eniyileme (Ant Colony Optimization)
Tütüncü	2010	Aç Gözlü Rassal Adaptif Hafıza Programı Araması (Greedy Randomized Adaptive Memory Programming Search)
Zachariadis ve Kiranoudis	2012	Etkin Yerel Arama (Effective Local Search)
Pradenas vd.	2013	Dağıtma Arama (Scatter Search)
Wang ve Chen	2013	Birlikte Evrimleşen Algoritma (Co-evolutionary Algorithm)
Cuervo vd.	2014	Yerel Arama (Local Search)
Yu ve Qi	2014	Yasaklı Arama
Karaoğlu ve Altıparmak	2015	Memetik Algoritma
Küçükoglu ve Öztürk	2015	Melez Algoritma –Yasaklı Arama ve Tavlama Benzetimi (Hybrid Algorithm)
Nájera vd.	2015	SSMOEA Algoritması (Similarity-based selection multi-objective evolutionary algorithm)

Mingozzi ve Giorgi (1999), ÖDST-ARP'nin eniyi çözümü için geçerli alt sınırı elde eden tam sayılı modelin, doğrusal gevşetiminin ikil modelini çözen ve D olarak adlandırılan sezgisel yöntemi kullanmıştır. D sezgiseli iki farklı sezgisel yöntemin birleştirilmesiyle oluşmuştur. Bu sezgisel sayesinde ikil kısıtların tüm kümesine gerek kalmadan uygun çözüm

bulunabilmektedir. Elde edilen ikil çözüm ve ÖDST-ARP’de geçerli alt sınır, eniyi çözümü oluşturan rotaların sayısını azaltmak için kullanılmaktadır.

Toth ve Vigo (1999), simetrik ve asimetrik uzaklık matrisine sahip ÖDST-ARP için kümeleme yaklaşımını kullandıkları iki aşamalı önce kümele sonra rotala sezgisel yaklaşımı geliştirmiştir. TV sezgiseli adını verdikleri bu sezgisel ile elde edilen rotalarda, rota içi ve rotalar arası değişim sayesinde gelişme sağlanmıştır.

Wade ve Salhi (2002), ÖDST-ARP’ yi yeni bir bakış açısı ile ele almıştır. Bu yeni yaklaşıma göre dağıtım yapılan müşterilere belli bir oranda hizmet verildikten sonra toplama yapılan müşterilere uğramak mümkündür. Bu problemler için 0-1 tam sayılı matematiksel model geliştirilmiş ve çözüm için ekleme tipi sezgiseli önerilmiştir.

Ropke ve Pisinger (2006), çalışmalarında literatürde yer alan çeşitli ÖDST-ARP için önerilen yöntemleri değerlendirmiş ve farklı türleri çözebilecek birleştirilmiş bir model geliştirmiştir. Geliştirilen modelin çözümü için geniş komşuluk arama yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm yöntemi literatürden alınan 338 test problemi üzerinde denenmiş ve bu problemlerden 227 sinde literatürde yer alan eniyi çözüme ulaşılmıştır.

Tavakkoli-Moghaddam, Saremi ve Ziaee (2006), çalışmalarında ÖDST-ARP çözümü için farklı yerel arama algoritmalarını kullanan memetik algoritma önermiştir. Araçlar heterojen yani kapasiteleri birbirinden farklı olarak değerlendirilmiştir. Önerilen memetik algoritmada ilk uygun çözüm, uyarlanmış Solomon ekleme sezgiseli ile elde edilmektedir. Daha sonra yasaklı arama, yerel arama ve ilerleme algoritmaları çözümü ilerletmek için kullanılmıştır. Literatürden alınan bazı test problemleri üzerinde algoritmanın etkinliği değerlendirilmiştir.

Brandão (2006), çalışmasında ÖDST-ARP için yasaklı arama algoritmasını kullanmıştır. Başlangıç çözümü elde etmek için “açık başlangıç çözümü” ve “K-ağaç başlangıç” çözümü olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Açık başlangıç çözümünde dağıtım ve toplama olmak üzere her iki müşteri grubunun ayrı ayrı rotaları oluşturulmakta daha sonra bu rotalar birleştirilmektedir. K ağaç başlangıç yöntemi ise sahte alt sınırlara (pseudo-lower bound) dayanmaktadır. Önerilen yasaklı arama algoritması literatürde yer

alan test problemleri üzerinde çalıştırılmış ve test problemlerinin bir bölümü için literatürden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Wang ve Wang (2009), çalışmalarında iki aşamalı sezgisel geliştirmiştir. Araç hızlarının farklı olduğu düşünülüp zamana bağlı olarak araçların hızları da değerlendirilmiştir. İlk aşamada orijinal çözüm geleneksel sezgisel yöntemler ile oluşturulmakta, ikinci aşamada ise reaktif yasaklı arama algoritması orijinal çözümü eniyilemek için kullanılmıştır. Geliştirilen yaklaşımın etkinliği test problemleri üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. En yakın komşuluk sezgiseli ile karşılaştırıldığında iki aşamalı sezgiselin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Tütüncü, Carreto ve Baker (2009), çalışmalarında klasik ÖDST-ARP ve Karma ÖDST-ARP olarak adlandırdıkları genişletilmiş versiyon için yeni görsel interaktif bir yaklaşım önermiştir. Karma ÖDST-ARP olarak isimlendirilen genişletilmiş versiyonda toplama noktalarına uğranıldıktan sonra dağıtım noktalarına uğranılmasına da izin verilir. Önerilen yaklaşım açgözlü rassal adaptif hafıza programı aramasına dayanmaktadır.

Gajpal ve Abad (2009), çalışmalarında ÖDST-ARP problemi için toplam mesafeyi enküçüklemeyi amaçlayan çoklu karınca kolonisi algoritmasını önermiştir. Oluşturulan rotalar ekleme (insertion) ve değiştirme (swap) operatörlerini içeren yerel arama ile iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Tütüncü (2010), çalışmasında karma kapasiteli ARP ve karma kapasiteli sabit araç sayılı ÖDST-ARP problemi için açgözlü rassal adaptif hafıza programı aramasına dayanan görsel interaktif yaklaşım geliştirmiştir. Ayrıca yöntemin kullanımı amacıyla bir karar destek sistemi geliştirilmiştir.

Zachariadis ve Kiranoudis (2012), yaptıkları çalışmayla değişken uzunluktaki müşteri dizilerinin değişiminden oluşan komşuluk çözümlerini tarayan bir Yerel Arama metasezgiseli geliştirmiştir.

Pradenas vd.(2013), çalışmalarında zaman pencereli ÖDST-ARP için her rotanın enerji gereksinimi ile birlikte müşteriler arasında taşınan yükü de dikkate alarak sera gazı

salınımını azaltmayı amaçlamıştır. Çözüm için dağıtma arama algoritması geliştirilmiş ve literatürden alınan problemler üzerinde kullanılmıştır. Geliştirilen çözüm yaklaşımın sonuçlarına göre seyahat ve taşıma maliyeti azalırken enerji gereksiniminin arttığı, tüketilen yakıt miktarı azalırken sera gazı salınımının da azaldığı gözlenmiştir.

Wang ve Chen (2013), toplam seyahat maliyetinin ve araç sayısının enküçüklenmesi amacı ile esnek zaman pencereli bir topla dağıt araç rotalama problemi için karma tamsayılı bir model geliştirmiştir. Problemin zorluk derecesinden dolayı çözüm için geliştirilen yöntemde yer değiştirme metodunun bir versiyonu, birlikte evrimleşen algoritma ile birleştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen algoritmanın etkinliği literatürden alınan test problemleri üzerinde gösterilmiştir.

Cuervo vd. (2014), ÖDST-ARP çözümü için yinelemeli yerel arama algoritması geliştirmiştir. Algoritma temel olarak iki yapıya dayanmaktadır. Bunlardan ilki her iterasyonda geniş bir komşuluk yapısını incelemesi, ikincisi ise sezgiselin çözüm uzayında uygun ve uygun olmayan çözümler arasında sürekli bir geçiş sağlamasıdır.

Yu ve Qi (2014), çalışmalarında zaman pencereli ÖDST-ARP için matematiksel bir model oluşturmuş ve çözüm yaklaşımı olarak iki farklı yasaklı arama algoritması önermiştir. Algoritmaların etkinliği Hong Kong’da bulunan bir nakliye şirketinin verileri ve literatürden alınan örnekler üzerinden sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Karaoğlu ve Altıparmak (2015), çalışmalarında Kapasiteli Güzergâh Rotalama Problemini (Capacitated Location-Routing Problem) ve Kapasiteli Karma Geri Toplamalı Güzergâh Rotalama Problemini (Capacitated Location-Routing Problem with Mixed Backhauls-CLRPMB) ele almıştır. Problemin çözümü için memetik algoritma kullanılmış ve geliştirilen algoritmanın her iki problem türü için etkin sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Küçüköğlu ve Öztürk (2015), ÖDST-ARP çözümü için toplam seyahat maliyetini enküçüklemeyi amaçlayan yasaklı arama ve tavlama benzetiminden oluşan bir melez algoritma önermiştir. Önerilen metasezgisel yaklaşım, 25, 50 ve 100 düğüm kapsayan Solomon problemleri üzerinde çalıştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde ÖDST-ARP için farklı çözüm yöntemleri ile başarılı sonuçlar elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür. Geliştirilen çözüm yaklaşımları ile başta toplam seyahat maliyetini enküçüklemek olmak üzere araç rotalama problemlerinde hedeflenen klasik amaçlara ulaşıldığı görülmektedir. Ancak günümüzde devam etmekte olan sistemler, çevre ile uyum sağlamalıdır. Başka bir deyişle, rotalama problemleri değerlendirilirken taşımacılık kaynaklı çevresel etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Karayolu taşımacılığı, %85 ile ulaşım sektörü içinde en yüksek sera gazı salınımı kaynağı durumundadır ve karayolu kaynaklı salınım miktarı sürekli artış göstermeye devam etmektedir (www.utikad.org.tr). Yük taşımacılığı alanında karayolu kullanım oranı ülkemizde %76,1 civarındayken bu oran ABD'de %69,5, AB ülkelerinde ise yaklaşık %45'tir (www.mfa.gov.tr). Söz konusu oranlara bakıldığında araç rotalama problemlerinin klasik ARP'de olduğu gibi mesafenin dışında sera gazı salınımı gibi çevresel faktörler açısından da ele alınması gerektiği görülmektedir. Literatürdeki belli çevreci çalışmalar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çevresel faktörlerin değerlendirildiği rotalama problemlerine öncülük eden ilk çalışma erişilebilen literatüre göre 2007 yılında Kara vd. tarafından yapılmış olup, Enerji Enküçüklemeli Araç Rotalama Problemi (Energy Minimizing Vehicle Routing Problem-EEARP) ele alınmıştır. İncelenen problemde toplam mesafenin enküçüklenmesine ek olarak taşınan toplam yükün (mesafe x yük) enküçüklenmesi amacı da değerlendirilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonuna uygun olarak elde edilen rotalar, klasik toplam mesafeyi enküçükleme amaç fonksiyonu ile elde edilen rotalar ile karşılaştırılmıştır.

Kara vd. (2008), tarafından yapılan çalışmada yük miktarına bağlı yakıt tüketimli model incelenmiştir. Burada önemli olan aracın izleyeceği turun yönüdür. Dağıtım yapılacak müşteriler kümesinden oluşan bir rotada aracın yükü her müşteriden sonra azalma eğilimindeyken toplama yapılacak müşteriler kümesinden oluşan bir rota için tam tersi durum söz konusu olabilmektedir. Bu çalışmada yakıt tüketimli toplama ve dağıtma modelleri için karma tamsayılı modeller oluşturulmuş ve CPLEX 8.0 ile çözdürülmüştür.

Çizelge 2.2. Çevreci rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri

Yazarlar	Yıl	Yaklaşım
Kara vd.	2007	Tamsayılı Programlama
Kara vd.	2008	Karma Tamsayılı Programlama
Kuo	2010	Tavlama Benzetimi
Figliozzi	2010	Tekrarlı Rota Kurma ve Geliştirme Algoritması (Iterative Route Construction and Improvement Algorithm)
Demir vd.	2011	Benzetim
Ubeda vd.	2011	En Yakın Komşuluk Algoritması (Nearest Neighbour Algorithm), Mole ve Jameson Yöntemi
Bektaş ve Laporte	2011	Tamsayılı Programlama
Xiao vd.	2012	Tavlama Benzetimi
Erdoğan ve Hooks	2012	Clarke-Wright Algoritması ve Yoğunluk Tabanlı Kümeleme Algoritması (Density Based Clustering Algorithm)
Demir vd.	2012	Uyarlamalı Geniş Komşuluk Arama
Li	2012	Yasaklı Arama
Pradenas vd.	2013	Dağıtma Arama Algoritması
Kwon vd.	2013	Yasaklı Arama
Demir vd.	2014	Uyarlamalı Geniş Komşuluk Arama (Adaptive Large Neighborhood Search)
Koç vd.	2014	Melez Evrimsel Metasezgisel
Kumar	2015	Öz Öğrenimli Parçacık Sürü Eniyileme (Self-Learning Particle Swarm Optimization)
Kramer	2015	Küme Bölüntülü Tekrarlı Yerel Arama (Iterated Local Search with a Set Partitioning) ve Hız Eniyileme Algoritması (Speed Optimization Algorithm)

Kuo (2010), diğer çalışmalardan farklı olarak trafiğin gün içerisindeki durumunu da göz önünde bulundurmuş ve çözüm yaklaşımı olarak tavlama benzetimi kullanmıştır. Yapılan çalışmada günün farklı saatlerinde farklı hızlardaki araçların birim yakıt miktarları incelenmiştir. Ayrıca aracın taşıdığı yük miktarı ve aracın kapasitesi aracılığı ile araçlara ait % doluluk oranları hesaplanmış ve amaç fonksiyonu hesaplanırken bu oranın da hesaplama katılması ile daha az yakıt tüketimi sağlayan rotalar elde edileceği ileri sürülmüştür.

Figliozi (2010), araç rotalama problemlerinde toplam salınım miktarının ve yakıt tüketiminin en aza indirilmesinin birincil veya ikincil amaç olması gerektiğine dikkat çekerek zaman pencereli araç rotalama problemlerini incelemiştir. Çalışmada aynı problem türü için iki farklı amaç fonksiyonu yapısı oluşturulmuş ve iki farklı model incelenmiştir. Değerlendirilen birinci modelde toplam maliyetin enküçüklemesi amaçlanırken ikinci modelde ise maliyetlerin kısmi olarak enküçüklenmesi incelenmiştir. Bu modelin çözümü için zaman bağımlı araç rotalama problemleri için kullanılan çözüm yönteminden yola çıkılarak bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda araç rotalama problemlerinde salınımını dikkate alarak salınım miktarında azalma sağlanabileceği gösterilmiştir.

Demir vd. (2011), karayolu taşımacılığında yakıt tüketimi ve sera gazı salınımını değerlendirmek için geliştirilen 6 farklı modeli karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Bu modeller sırasıyla, anlık yakıt tüketimi modeli (instantaneous fuel consumption model) (Bowyer vd., 1985), 4-modlu temel yakıt tüketim modeli (four-mode elemental fuel consumption model) (Akçelik, 1982), seyir hızı yakıt tüketim modeli (running speed fuel consumption model) (Bowyer, 1985), toplu biçimli tüketim modeli (comprehensive modal emission model) (Barth vd., 2000), (Barth ve Boriboonomsin, 2008), ulaştırma salınım ve enerji tüketimi yöntemi (methodology for calculating transportation emissions and energy consumption) (Hickman, 1999) ve karayolu taşımacılığında salınım hesaplayıcı bilgisayar programıdır (Computer programme to Calculate Emissions From Road Transportation) (Ntziachristos ve Samaras, 2000). Söz konusu altı farklı model, araç, sürücü, çevresel durumlar ve trafik akışı olmak üzere dört farklı faktörü içeren farklı senaryolarda birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma ile araç büyüklüğü, yol eğimi ve seyir hızının yakıt tüketimi üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Ubeda vd. (2011), bir durum çalışması üzerinden lojistik yöneticilerine, verimlilik hedeflerine ulaşırken eşzamanlı olarak yeşil lojistik uygulamalarını nasıl hayata geçireceklerine dair yol göstermeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında çevresel etkiler değerlendirilirken CO₂ salınımının araç tipi, taşınan yük, seyahat mesafesi ve yakıt türüne bağlı olduğu varsayılarak CO₂ salınımını tahminlenmeye çalışılmıştır.

Bektaş ve Laporte (2011), Çevreci Rotalama Problemi (Pollution Routing Problem) olarak tanımladıkları problem için klasik araç rotalama problemlerinden farklı olarak, sera

gazı salınımı, seyahat süreleri, yakıt miktarı ve onların maliyetlerini içeren daha geniş ve kapsamlı bir amaç fonksiyonu sunmuştur. Önerilen modeli üç farklı bakış açısıyla değerlendirmiş ve gerçek veriler ile üç farklı modeli çözerek eniyi rotaları belirlemiştir. Birinci model hız ve yük faktörünü göz önünde bulundurmakta, ikinci model zaman pencereli ya da zaman penceresiz olmak üzere CO₂ salınımını enküçüklemekte, üçüncü model ise çeşitli bileşenler (uzaklık, yük, salınım, maliyet, vb.) arasında ödünleşme analizi yapmaktadır. Çalışma sonucunda problemin eniyi çözümünün bulunmasının araç rotalama problemlerine göre daha zor olmasına rağmen toplam maliyet üzerinden tasarruf etme potansiyelinin olduğu belirtilmiştir.

Xiao vd. (2012), yakıt tüketimini enküçüklemek amacıyla yakıt tüketim oranı (Fuel Consumption Rate –FCR) adını verdikleri ve araç yüküne bağlı bir faktörü kapasiteli araç rotalama problemine ilave etmiştir. Üzerinde çalışılan problem tipi “Yakıt Tüketimli Araç Rotalama Problemi” olarak adlandırılmıştır. Önerilen model için dört hareket mekanizması içeren bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir.

Erdoğan ve Hooks (2012), önerdikleri modeli Yeşil Araç Rotalama (Green Vehicle Routing) adlandırmıştır. Bu model, yakıt bitmesi ihtimalini ortadan kaldırmak amacıyla müşterilere hizmet verilirken araçların alternatif yakıt istasyonlarında durabildiği ve toplam seyahat mesafesini enküçükleyen araç rotalarını araştırır. Küçük örnek büyüklükleri için dört farklı senaryo oluşturulmuş ve söz konusu senaryolar için problemlerin kesin çözüm değerini CPLEX çözücü ile elde edilmiştir. Daha sonra Clarke and Wright algoritması ve yoğunluk tabanlı kümeleme algoritması ile elde edilen sonuçları kesin çözüm değerleri ile karşılaştırmıştır.

Demir vd. (2012), inceledikleri problemi daha önceki çalışmalarında olduğu gibi çevreci rotalama başlığı altında değerlendirmiş ve zaman pencereli araç rotalama problemi için yakıt, salınım ve sürücü maliyetlerini içeren bir amaç fonksiyonunu enküçükleyecek şekilde optimal hızın belirlenmesi problemini incelemiştir. Problem çözümü için uyarlamalı geniş komşuluk arama sezgiselini önerilmiştir. Önerilen sezgisel iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada zaman pencereli araç rotalama probleminin çözümü için uyarlamalı geniş komşuluk arama yöntemi kullanılırken ikinci aşamada aynı problem türü için bir hız eniyileme algoritması çalıştırılmıştır. Hız eniyileme algoritması yakıt tüketimi ve sürücü

maliyetlerini içeren bir amaç fonksiyonu enküçükleyerek rota üzerinde yer alan her ayırıt için eniyi hızı bulmayı amaçlar.

Li (2012), daha önceki çalışmalarda olduğu gibi seyahat mesafesi, araç yükü ve bekleme süresi gibi faktörlerin yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu kapsamda zaman pencereli araç rotalama problemlerini değerlendirmiştir. Problem çözümü için rastgele değişken komşuluk yapısı kullanan bir yasaklı arama algoritması kullanılmıştır. Üç farklı model oluşturulmuş ve sayısal örnekler için önerilen algoritma çalıştırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu modeller sırasıyla; enkısa mesafe, enkısa süre ve enküçük miktar yakıt modelleridir.

Pradenas (2013), çalışmalarında zaman pencereli ve geri toplamalı araç rotalama problemleri için dağıtma arama algoritması tekniği ile sera gazı salınımını incelemiştir. Geri toplamalı zaman pencereli araç rotalama probleminin matematiksel modeli için Cho ve Wang (2005)'ın ÖDST-ARP için geliştirdiği matematiksel model kullanılmış, çevresel faktörlerin değerlendirilmesi için ise Bektaş ve Laporte (2011)'nin modelinden faydalanılmıştır. Literatürden alınan 100 müşteriye kadar olan örnek problemler için çözüm aranmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde araç rotalama problemleri içerisindeki çevresel etkilerin maliyetinin araç kullanım oranı, müşteriler arası taşınan yük ve müşteriler arası mesafeler ile ilgili olduğu sonucuna varılabileceğini belirtmiştir.

Kwon vd. (2013), önceki çalışmalara benzer şekilde karbon salınımını dikkate alan lojistik sistemlerindeki araç rotalama problemlerine odaklanmaktadır ancak çalışmayı farklı kılan firmaların karbon ticareti politikalarının da değerlendirilmiş olmasıdır. Problemi matematiksel olarak temsil edebilmek için toplam değişken maliyeti enküçüklemeyi amaçlayan karışık tamsayılı programlama modeli kullanılmıştır. Problemin çözümü için yasaklı arama algoritması üç farklı komşuluk üretme metodu ile birlikte geliştirilmiş ve sayısal deneyler ile elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Söz konusu komşuluk yapıları sırasıyla ekleme, değiştirme ve melez komşuluk yapılarıdır. Elde edilen çözümler değerlendirildiğinde ekleme ve değiştirme komşuluk yapılarını rastgele seçerek kullanan melez komşuluk arama yapısını içeren yasaklı arama algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Demir vd. (2014), çevreci rotalama problemini iki amaçlı olarak değerlendirmiştir. Birinci amaç fonksiyonu toplam seyahat süresinin enküçüklenmesi iken, ikinci amaç fonksiyonu ise Barth vd. (2005), Scora ve Barth (2006), ve Barth and Boriboonsomsin (2008) tarafından tanımlanan genişletilmiş salınım modellerine dayanan yakıt tüketiminin enküçüklenmesidir. Çözüm yöntemi olarak uyarlamalı geniş komşuluk arama sezgiseli sunulmuştur. Amaçlar değerlendirilirken normalleştirme işlemi yapılmış ve farklı skalerleştirme yöntemleri ile ele alınmıştır. İncelenen skalerleştirme yöntemleri ağırlıklı yöntem (weighting method), epsilon kısıt yöntemi (epsilon-constraint method) ve bu iki yöntemden oluşan yeni bir melez yöntemdir.

Koç vd. (2014), farklı boyutlardaki filo tiplerine sahip karma çevreci rotalama problemleri için matematiksel bir model önermiş ve çözüm yöntemi olarak melez bir evrimsel metasezgisel sunmuştur. Çözüm yönteminin etkinliği Bektaş ve Laporte (2011) tarafından literatüre kazandırılan ve Demir vd.(2012) tarafından geliştirilen çevreci rotalama problemi ile birlikte heterojen araç filosu kullanımına olanak sağlayan, karma filolu çevreci araç rotalama problemine ait sayısal örnekler üzerinden test edilmiştir.

Kumar vd. (2015), ürün rotalama problemi (production routing problem) ve çevreci rotalama problemini birlikte ele alarak “Çevreci-Ürün Rotalama Problemi (Production-Pollution Routing Problem)” olarak adlandırmış ve zaman penceresi kısıtları ile değerlendirmiştir. Çalışmalarında problemi çok amaçlı yapıda ele almışlardır. Amaçlardan ilki toplam seyahat maliyetini enküçükmek iken, ikinci amaç toplam salınımı yani toplam yakıt tüketimini enküçükmektir. Çözüm yöntemi olarak öz öğrenimli parçacık sürü eniyileme algoritması önerilmiştir. Algoritmanın etkinliği sayısal örnekler yardımıyla Baskın Olmayan Ayıklama Genetik Algoritması-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) ile test edilmiştir.

Kramer vd.(2015), Bektaş ve Laporte (2011) tarafından geliştirilen çevreci araç rotalama problemini zaman penceresi kısıtları altında incelemiştir. Oluşturulan amaç fonksiyonu seyahat maliyeti gibi operasyonel maliyetlerle birlikte, yakıt tüketimi, harcanan enerji gibi çevresel maliyetleri de içermektedir. Problem çözümü için küme bölüntülü tekrarlı yerel ve hız eniyileme algoritması önerilmiştir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda çevresel faktörleri değerlendiren rotalama problemlerinin son yıllarda artış gösterdiği görülmektedir. Bazı araştırmacılar bu problemleri “Çevreci Rotalama (Pollution Routing)”, bazıları “Yeşil Lojistik (Green Logistic)”, bazıları ise “Birikimli Araç Rotalama (Cumulative Vehicle Routing)” başlıkları altında değerlendirmiştir. İncelenen çevreci rotalama problemlerinin amaç fonksiyonlarında genellikle ARP’nin klasik amacı olan enküçük toplam seyahat mesafesine ek olarak toplam CO₂ salınımının enküçüklenmesi üzerinde durulmuştur. Toplam CO₂ salınımının enküçüklenmesinde ise yakıt tüketiminin etkisi göze çarpmaktadır. Bu çalışmada ÖDST-ARP problemi çevreci rotalama yaklaşımıyla ele alınmış ve problem çözümünden elde edilen değerler klasik ÖDST-ARP çözümünden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

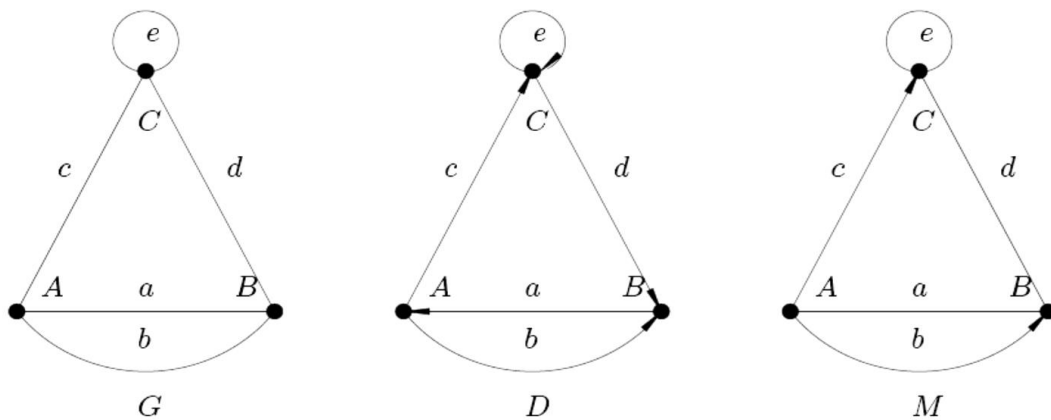


3. ROTALAMA PROBLEMLERİ

Rotalama problemi, bir veya daha fazla depoda konumlandırılmış bir veya daha fazla aracın, çeşitli bölgelerin (düğüm, ayırıt) taleplerini karşılayabilecek şekilde, çeşitli kısıtlar (araç kapasitesi, zaman penceresi vb.) altında bir amacı (kat edilen toplam yol uzunluğunun enküçüklenmesi, bir rotadaki en uzun ayırıtın enküçüklenmesi vb.) eniyileyecek şekilde araç turlarının belirlenmesi problemidir. Rotalama problemleri, literatürde düğüm rotalama ve ayırıt rotalama olmak üzere iki ana başlık altına incelenmektedir (Özsoydan, 2011).

3.1. Serim Kuramı

Bir serim (network, graph) $G=(V, E, A)$ ile gösterilir. Bu tanımlamada V düğümler (nodes, vertices) kümesini, E yönsüz ayırıtlar (edges) kümesini, A ise yönlü ayırıtlar (arcs) kümesini göstermektedir. Örneğin bir haritada şehirler düğümleri, şehirleri birbirine bağlayan yol bağlantıları ise ayırıtları gösterir. Bu durumda birbirinden farklı herhangi i, j şehirleri, bir serim üzerinde v_i, v_j düğümleri olarak ifade edilirken, bu düğümleri birbirine bağlayan ayırıt (i, j) şeklinde gösterilir. Ayırıtlar yönlü veya yönsüz olabilir. Ayırıtların yönlü olduğu durumda ayırıt için bir yön tanımlaması mevcuttur ve bu ayırıt üzerinden yalnızca tanımlanan yöne geçiş yapılabilir. Ayırıtların yönsüz olduğu durumda ise v_i 'den v_j 'ye veya v_j 'den v_i 'ye geçiş yapılabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yönsüz (G), Yönlü (D) ve Karma serim örneği (M) (Martínez, 2003)

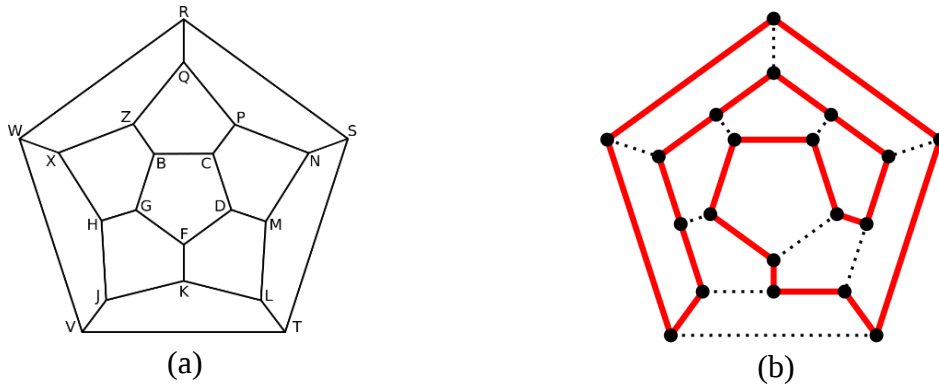
Serim, ayrıtların yönlü ve yönsüz olma durumlarına göre isimlendirilebilmektedir. Bir serimdeki ayrıtların tamamı yönsüz ise serim yönsüz serim (undirected graph), bütün ayrıtlar yönlü ise serim yönlü serim (directed graph) olarak adlandırılmaktadır. Ancak ayrıtların bir kısmı yönlü bir kısmı da yönsüz olduğu durumda bu serime de karma serim (mixed graph) denilmektedir (Gross and Yellen, 2004).

3.2. Rotalama Problemlerinin Sınıflandırılması

Rotalama problemlerini düğüm gezme (node routing) ve ayrıt gezme (arc routing) başlıkları altında sınıflandırmak mümkündür. Düğüm gezme problemlerinin bilinen ve en yaygın çeşitlerinden biri Gezgin Satıcı Problemi (Travelling Salesman Problem -GSP)'dir. Bu problem türünde başlangıç düğümüne geri dönülmesi ve tüm düğümlerin ziyaret edilmesi şartıyla toplam mesafe enküçüklenmeye çalışılır. Ayrıt gezme problemlerinde ise GSP'de olduğu gibi düğümlerin ziyaret edilmesi zorunlu değildir. Bu problem türünde önemli olan düğümler arasındaki ayrıtların ziyaret edilmesidir. Bu başlık altında ele alınan en yaygın problemlerden biri Çinli Postacı (Chinese Postman Problem -ÇPP)'dir.

Düğüm rotalama problemleri, ziyaret edilecek yerlerin düğümlerde tanımlandığı problemlerdir. Düğüm rotalama problemleri William Rowan Hamilton (1857) tarafından ortaya konulan "Icosian Game" isimli matematiksel oyun ile başlamıştır. Bu oyunda, düzgün bir oniki yüzlünün (dodecahedron) herhangi bir noktasından başlanarak, tüm noktalara uğranması, uğranılan noktaların tekrar edilmemesi ve başlangıç noktasına dönülmesi kısıtları altında uygun turun belirlenmesi amaçlanır. Hamilton tur problemi bu oyundan hareketle tanımlanmıştır. Düzgün oniki yüzlüye ait serim gösterimi ve karşı gelen Hamilton turu örneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

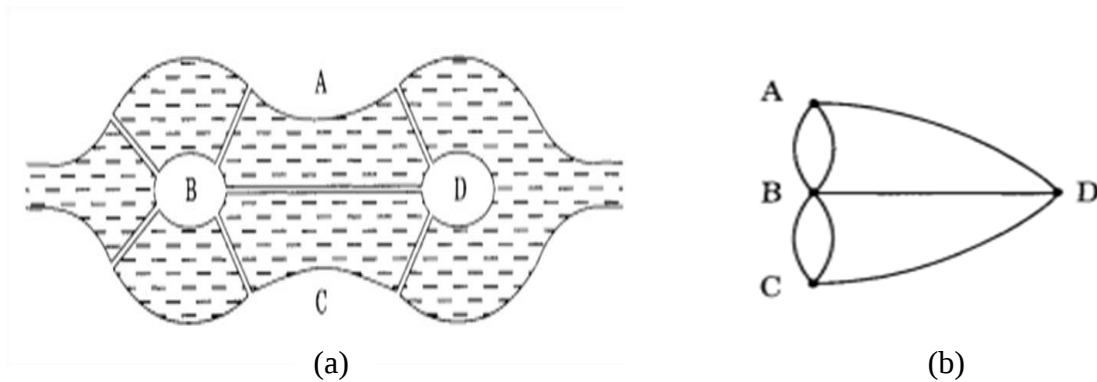
Gezgin satıcı problemleri, Hamilton turu esasına dayanan ve en yaygın bilinen düğüm rotalama problemleridir. GSP'de amaç Hamilton turu problemine paralel olarak, bir serimde herhangi bir düğümden başlanarak, düğüm tekrarı yapılmaması, tüm düğümlere uğranması ve başlangıç düğüme dönülmesi kısıtları altında endüşük maliyetli turu belirlemektir. Literatüde GSP'den türetilmiş birçok farklı problem bulunmaktadır. Araç rotalama problemleri GSP'den türetilen problem türlerinden biridir.



Şekil 3.2. a) Düzgün on iki yüzlü, b) Karşı gelen uygun bir Hamilton turu

Ayrıt rotalama problemi, belirli kısıtlar altında bir serimdeki yönlü ve yönsüz ayrıtlara servis verecek en küçük maliyetli turun belirlenmesi problemidir. Ayrıt rotalama problemi tarihi, 1735’de Leonard Euler tarafından tanımlanan Köningsberg köprüleri problemiyle başlar (Gribkovskaia, vd., 2007).

Ayrıt rotalama problemleri Köningsberg şehrinde bulunan yedi adet köprünün hepsinden yalnızca bir kez geçerek başlangıç noktasına dönecek rotanın bulunması amacıyla ortaya çıkan problemlerdir. Euler, söz konusu problemi serim biçiminde tanımlayarak literatüre Euler Turu (Euler Tour) kavramını tanıtmıştır. Köningsberg şehrindeki köprüler (a) ve karşı gelen serim gösterimi (b) Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. a) Köningsberg köprüleri, b) Köningsberg köprülerinin serim gösterimi (Koshy, 2004)

Literatürde Euler turu probleminden türeyen birçok problem türü bulunmaktadır. Bu problemlerin yaygın olarak en bilinen türü çinli postacı problemidir. Literatüre 1962 yılında

Mei-Ko Kwan tarafından kazandırılan ÇPP'nin amacı, serim üzerinde yer alan ayrıtlardan en az bir kez geçilerek başlangıç düğüme dönen en küçük maliyetli turu belirlemektir.

3.3. Araç Rotalama Problemi ve Türleri

Araç rotalama problemleri, coğrafi olarak dağınık merkezlere bir veya birden fazla depodan hizmet vermek üzere görevlendirilen araçların eniyi dağıtım/toplama rotalarının planlanması problemleridir (Laporte ve Nobert, 1987).

Araç Rotalama Problemi ilk olarak 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından literatüre kazandırılmıştır. Yazarlar bu çalışmalarında benzin istasyonlarına benzin dağıtım problemi üzerinde durmuş ve problemin çözümü için ilk matematiksel modeli kurmuştur. Araç Rotalama Problemi genel olarak bir işletmenin konumları belirli n adet müşterisine (talep noktasına) servis sunabilmesi için bazı operasyonel kısıtların göz önüne alındığı ve minimum maliyetin amaçlandığı araç rotalarının belirlenmesi problemidir (Erol, 2006).

Bir ARP problemine genel olarak şu bilgilere ihtiyaç vardır (Erol, 2006):

- Her müşteriden diğer müşterilere ulaşım süresi veya aralarındaki mesafe
- İşletme birimlerinden her müşteriye ulaşım süresi veya aralarındaki mesafe
- Talep noktalarındaki talep miktarı
- Araç sayısı ve araç kapasite değeri
- Eniyilenecek unsur veya unsurlar (amaç fonksiyonu).

Literatürde tanımlı birçok farklı ARP çeşidi vardır. Bunlardan en yaygın bilineni Kapasiteli Araç Rotalama Problemidir (Capacitated Vehicle Routing Problem -KARP). KARP, yönsüz bir serimde depo olarak tanımlanan bir düğümden yer alan m adet sınırlı kapasiteli araca ait, serimde yer alan tüm düğümlere sadece bir kez uğranması, taleplerinin karşılanması ve düğüm tekrarı yapılmadan depoya dönüş yapmak şartıyla en küçük maliyetli turların belirlenmesi problemidir.

$G = (V, A)$ ile gösterilen bir serim olmak üzere, $V = \{0, \dots, n\}$ müşteriler kümesini ve A ayrıtlar kümesini gösterir. "0"(sıfır) nolu düğüm depoyu ve c_{ij} i . müşteriden j . müşteriye gitme maliyetini göstermektedir. G seriminin yönlü olduğu durumda, c maliyet

matrisi asimetriktir ve bu durumda $c_{ij} \neq c_{ji}$ 'dir. Bu yapıdaki problemler Asimetrik Klasik Araç Rotalama (Asymmetric Vehicle Routing Problem -AKARP) olarak adlandırılır. Eğer $c_{ij} = c_{ji}$ ise problem Simetrik Klasik Araç Rotalama (Symmetric Vehicle Routing Problem-SKARP) olarak adlandırılır.

İki indisli araç rotalama modeli AKARP ve SKARP'in temel versiyonları için yaygın şekilde kullanılmaktadır ancak ARP'nin daha karmaşık yapıdaki modelleri için genellikle yetersiz kalmaktadır. İki indisli model ile ilgili eksikliklerin giderilmesi, ayrıt üzerinde hareket eden k araç indisinin $k = (1, \dots, K)$ modele eklenmesi ile mümkündür. Bu durumda model üç indisli hale gelir. Hem AKARP hem de SKARP için uygun olan bu modeli aşağıda belirtilen şekilde açıklamak mümkündür (Toth ve Vigo ,2002):

Parametreler

c_{ij} : i . müşteriden j . müşteriye gitme maliyeti
 d_i : i . müşteri talebi

Karar Değişkenleri

x_{ijk} : k aracı ile i . müşteriden j . müşteriye geçildiyse 1,
diğer durumlarda 0
 y_{ik} : i . müşteri k aracı tarafından ziyaret edildiyse 1,
diğer durumlarda 0

$$Enk z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \quad (3.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \quad (3.2)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} = K, \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall i \in V, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in V} d_i y_{ik} \leq C \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijk} \geq y_{hk} \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, h \in S, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, |S| \geq 2, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.7)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \quad k = 1, \dots, K. \quad (3.9)$$

Kısıt (3.1) amaç fonksiyonudur ve toplam rota maliyetinin enküçüklenmesini amaçlar. Kısıt (3.2)-(3.4) her müşterinin yalnızca ve mutlaka bir kez ziyaret edilmesi gerektiğini gösterir. Kısıt (3.5) her k aracı için kapasite kısıdıdır. Kısıt (3.6) k aracına ait rotadaki bağlantıların gerçekleştirilmesini sağlar. Kısıt (3.7) ise alttut engelleme kısıdıdır.

Amaç fonksiyonları araçların tur uzunluklarının enküçüklenmesi şeklinde tanımlanan KARP'nin bazı türleri şunlardır:

Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇDARP) (Multi Depot Vehicle Routing Problem): Müşterilere ait taleplerinin birden fazla dağıtım merkezi (depo) ile karşılandığı rotalama problemleridir.

Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi (AARP) (Open Vehicle Routing Problem): Araçların depoya dönme zorunluluğunun olmadığı rotalama problemleridir.

Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi (ZPARP) (Vehicle Routing Problem with Time Windows): Her müşteri için tanımlı belirli bir zaman aralığında hizmet verme kısıdı içeren rotalama problemidir.

Olasılıklı Araç Rotalama Problemi (OARP) (Probabilistic Vehicle Routing Problem): Talep veya hizmet verilecek müşterilerin varlığının olasılıklı olduğu rotalama problemidir.

Kısmi Teslimatlı Araç Rotalama Problemi (KTARP) (Split Delivery Vehicle Routing Problem): Müşteri talepleri birden fazla araç tarafından karşılanabildiği rotalama problemidir. Bu problem türünde bir müşteri birden fazla araç tarafından hizmet alabilir yani müşteri talebi bölünebilir yapıdadır.

Dönemlik Araç Rotalama Problemi (DARP) (Periodic Vehicle Routing Problem): P gibi bir periyotda müşterilere k defa uğranması gereken rotalama problemidir. $1 \leq k \leq P$ olmalıdır. P=1 olması durumunda problem klasik kapasiteli araç rotalama problemli halini alır.

Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TDARP) (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery): Müşteriden toplanan ürünlerin doğrudan diğer bir müşteriye taşınmasının söz konusu olmadığı problem türüdür. Bu problem türünde bütün talepler depodan müşteriye ya da müşteriden depoya taşınabilmektedir.

Bu varsayımlar altında topla dağıt TDARP'nin üç farklı tipi bulunmaktadır. Bunlar (Karaoğlu, 2009);

- Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÖDST-ARP),
- Karışık Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (KTDARP),
- Eşzamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETDARP).

Tez çalışmasında ele alınan problem türü ÖDST-ARP'dir. ÖDST-ARP, her müşterinin talebinin olduğu ancak bazı müşterilerin veya hepsinin arzının da olduğu problemlerdir. Önemli olan nokta, müşterilere önce dağıtım sonra toplama hizmeti verilmesidir. ÖDST-ARP ile ilgili detaylı bilgi izleyen bölümde verilecektir.

4. ÖNCE DAĞIT SONRA TOPLA ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN ÇEVRECİ ROTALAMA YAKLAŞIMI

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle literatürde yer alan homojen araç filolu ÖDST-ARP'ye ait matematiksel modeller incelenmiş ve ardından çevreci rotalama başlığı altında sunulan matematiksel model detaylı olarak anlatılmıştır. Modele ilişkin boyut analizi yapılmış ve problemin zorluğu küçük boyutlu test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Test problemleri klasik ÖDST-ARP problemi için “toplam seyahat mesafesinin enküçüklenme” ve “toplam yakıt tüketimi maliyetinin enküçüklenmesi” amaçları için GAMS'in CPLEX 9.0 çözücüsü ile çözdürülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.1. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi

ÖDST-ARP, 20 yılı aşkın bir süredir üzerinde durulan, sezgisel ve kesin çözüm yöntemleri ile çözüm aranılan bir problem olmuştur. ÖDST-ARP, dağıtım ve toplama noktalarını içeren ARP'nin genişletilmiş bir halidir. Dağıtım noktaları tek merkez noktadan ürünlerin dağıtıldığı bölgelerdir. Toplama noktaları ise ürünlerin toplanıp dağıtım merkezine getirildiği bölgelerdir (Goetschalckx vd., 1989).

ÖDST-ARP, aşağıda listelenen özellikleri taşır ve K adet aracın rotasını maliyet minimum olacak şekilde bulmayı hedefler (Toth vd., 1997).

- Her araç bir adet rota oluşturur.
- Her rota dağıtım merkezini içerir.
- Her müşteri bir kez ziyaret edilir.
- Bir rotada ziyaret edilen dağıtım ve toplama noktalarının taleplerinin toplamı, araç kapasitesini geçemez.
- Her bir rotada dağıtım noktalarından sonra toplama noktalarına gidilir.

ÖDST-ARP'de müşteriler dağıtım (linehaul) ve toplama (backhaul) müşterileri olmak üzere iki guruba ayrılır. Bu problemde bir rota üzerinde, dağıtım müşterilerine

toplama müşterilerinden önce hizmet verilmektedir. Bu varsayım genelde, araç içerisinde dağıtılacak ürünler ile toplanan ürünlerin tekrar yerleştirilmesinin mümkün olmadığı durumlar için söz konusudur. Yani araç dağıtım müşterilerinin talepleri ile yüklenip, bütün ürünler dağıtılıp araç boşaldıktan sonra toplama müşterilerine hizmet verilmektedir. Ana depolardan marketlere sebze-meyve dağıtımından sonra üreticilerden yeni ürünlerin depoya taşınması bu problem tipine örnek olarak verilebilir (Ropke ve Pissinger, 2006).

4.2. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemine Ait Matematiksel Modeller

Tez kapsamında homojen araç filosuna sahip ÖDST-ARP incelenmiştir. Bu doğrultuda literatürde önerilen üç matematiksel model göze çarpmaktadır. Çalışılan problemin matematiksel modelini değerlendirmeden önce literatürde önerilen matematiksel modelleri incelemekte fayda vardır.

Goetschalckx ve Jacobs-Blecha karar modeli

ÖDST-ARP'nin matematiksel modeli ilk defa Goetschalckx ve Jacobs-Blecha tarafından 1989 yılında önerilmiştir. Goetschalckx ve Jacobs-Blecha'nın geliştirdiği model, daha önce Fisher ve Jaikumar tarafından araç rotalama problemi için geliştirilen modelden türetilmiştir. Goetschalckx ve Jacobs-Blecha modellerinde, müşterilerin kümelenmesini genel atama problemi müşteriler için eniyi turun bulunması ise gezgin satıcı problemi olarak ele almıştır. Geliştirilen modele ait parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda gösterildiği gibidir.

Parametreler

- K : Araç sayısı,
- N : Dağıtım yapılacak müşteriler kümesi, indeks;1,2,...,N,
- M : Toplama yapılacak müşteriler kümesi, indeks;N+1,N+2,...,N+M,
(0, dağıtım merkezi indeksini göstermektedir)
- a_i : Dağıtım müşterileri talebi, ($i = 1, \dots, N$)
- b_i : Toplama müşterileri arzı, ($i = N+1, \dots, N+M$)
- C : Araç kapasitesi,
- c_{ij} : i. müsteriden j. müsteriye gitmenin maliyeti, ($i, j = 0, \dots, N+M$)

Karar Değişkenleri

u_{ik} : i . dağıtım yapılacak müşteri k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, diğer durumlarda 0; $i = 0, \dots, N$.

v_{jk} : j . toplama yapılacak müşteri k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, diğer durumlarda 0; $j = N + 1, \dots, N + M$ ve $j = 0$.

x_{ijk} : k aracı i . müşteriden j . müşteriye geçerse 1, diğer durumlarda 0; $i, j = 0, \dots, N + M$.

$$Enk \ z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{N+M} \sum_{j=0}^{N+M} c_{ij} x_{ijk} \quad (4.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^N a_i u_{ik} \leq C \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=1}^K u_{ik} = 1 \quad \forall i, \ i = 1, \dots, N, \quad (4.3)$$

$$u_{0k} = 1 \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.4)$$

$$u_{ik} = 0 \text{ veya } 1 \quad \forall i, \ i = 1, \dots, N, \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=N+1}^{N+M} b_i v_{ik} \leq C \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.6)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{ik} = 1 \quad \forall i, \ i = 1, \dots, N, \quad (4.7)$$

$$v_{0k} = 1 \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.8)$$

$$v_{ik} = 0 \text{ veya } 1 \quad \forall i, \ i = N + 1, \dots, N + M, \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} u_{jk}, & \text{eğer } j = 1, \dots, N, \\ v_{jk}, & \text{eğer } j = N + 1, \dots, N + M, j = 0, \end{cases} \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.10)$$

$$\sum_{j=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} u_{ik}, & \text{eğer } i = 0, 1, \dots, N, \\ v_{ik}, & \text{eğer } i = N + 1, \dots, N + M, \end{cases} \quad \forall k, \ k = 1, \dots, K, \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{\substack{j=0 \\ N+1}}^{N+M} x_{ijk} = 1 \quad \forall k, k = 1, \dots, K, \quad (4.12)$$

$$x_{ijk} \in S \quad (4.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad i, j = 0, \dots, N + M, k = 1, \dots, K, \quad (4.14)$$

$$S = \{x_{ijk} : \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} \leq |Q| - 1\} \quad (Q = 1, \dots, N + M \text{ kümesinin her alt kümesi için}) \quad (4.15)$$

Kısıt (4.1) amaç fonksiyonudur ve toplam rota maliyetinin enküçüklenmesini amaçlar. (4.2) ve (4.6) numaralı kısıtlar hem dağıtım hem toplama yapılacak müşteriler için araç kapasitesinin aşılmamasını sağlar. Kısıt (4.3) ve (4.7) dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin yalnızca ve mutlaka bir araç tarafından hizmet almasını garanti eder. Kısıt (4.4) ve (4.8) dağıtım merkezinden (depo) K adet aracın çıkmasını ve bu araçların dağıtım merkezine (depo) geri dönmesini sağlar. (4.10) nolu kısıt hizmet alan her müşteriye yalnızca ve mutlaka bir araç tarafından gelineceğini, (4.11) nolu kısıt ise hizmet alan her müşteriden yalnızca ve mutlaka bir araç ile ayrılacağını gösterir. Kısıt (4.12) her rotada dağıtım yapılacak müşteriler ve toplama yapılacak müşteriler arasında yalnızca bir bağlantı olabileceğini gösterir. Kısıt (4.15) ise alttur engelleme kısıdıdır.

Toth ve Vigo karar modeli

Toth ve Vigo 1997 yılında yaptıkları çalışmada ÖDST-ARP için bir tamsayılı karar modeli geliştirmiştir. Asimetrik ÖDST-ARP için de geçerli olan bu model, atama kısıtları ve alt tur engelleme kısıtlarını içermektedir.

Kümeler

$$G' = (V'_0, A')$$

$$V_0 = \{0\} \cup \{1, \dots, n\} \cup \{n + 1, \dots, n + m\}$$

$$L = \{1, \dots, n\}$$

$$B = \{n + 1, \dots, n + m\}$$

$$V = V_0 \setminus \{0\}$$

$$L_0 = L \cup \{0\}$$

$$B_0 = B \cup \{0\}$$

$$G = (V_0, A)$$

$$A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$$

$$A_1 = \{(i, j) \in A' : i \in L_0, j \in L\}$$

$$A_2 = \{(i, j) \in A' : i \in B, j \in B_0\}$$

$$A_3 = \{(i, j) \in A' : i \in L, j \in B_0\}$$

Ayrıtlar kümesi olan A , üç ayrık alt kümeye ayrılmaktadır. İlk alt küme depodan veya dağıtım yapılacak müşterilerden, dağıtım yapılacak müşterilere olan bağlantıları içeren ayrıtlar kümesidir. İkinci alt küme toplama yapılacak müşterilerden, toplama yapılacak müşterilere veya depoya olan bağlantıları içerir. Üçüncü alt küme dağıtım yapılacak müşteriler kümesinden, toplama yapılacak müşteriler kümesine veya dağıtım merkezine giden ayrıtlar kümesidir. Bu tanımlama sayesinde A ayrıtlar kümesi, toplama yapılacak müşterilerden dağıtım yapılacak müşterilere bağlantı gibi uygun olmayan çözümleri içermez.

L kümesindeki düğümlerin tüm alt kümeler kümesi L ; B kümesindeki düğümlerin tüm alt kümeler kümesi B ile ifade edilsin ve $F = L \cup B$ olsun. Her bir $S \in F$ için $r(S)$, S 'deki tüm müşterilere hizmet vermek için gerekli olan araç sayısını göstermektedir. Her $i \in V_0$ için $\Delta_i^+ = \{j : (i, j) \in A\}$ ve $\Delta_i^- = \{j : (j, i) \in A\}$ olarak tanımlandığında, Δ_i^+ herhangi bir düğümden gidilebilecek uygun çözümler kümesini gösterirken, Δ_i^- ise herhangi bir düğüme gelinebilecek uygun düğümler kümesini gösterir. ÖDST-ARP için önerilen tam sayılı model aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Parametreler

K : Araç sayısı

c_{ij} : i . düğümden j . düğüme yolculuk maliyeti

Karar Değişkenleri

x_{ij} : i . müşteri den j . müşteriye geçildiyse 1,
diğer durumlarda 0

$$Enk z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (4.16)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i \in \Delta_j^-} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (4.17)$$

$$\sum_{j \in \Delta_i^+} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V, \quad (4.18)$$

$$\sum_{j \in \Delta_0^-} x_{i0} = K, \quad (4.19)$$

$$\sum_{j \in \Delta_0^+} x_{0j} = K, \quad (4.20)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in \Delta_j^- \setminus S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \in F, \quad (4.21)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in \Delta_i^+ \setminus S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \in F, \quad (4.22)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V_0 \quad (4.23)$$

Kısıt (4.16) amaç fonksiyonunudur. Kısıt (4.17) ve (4.18) müşteriler için, kısıt (4.19) ve (4.20) ise dağıtım merkezi (depo) için düğüm derecelerini göstermektedir. (4.21) ve (4.22) numaralı kısıtlar ise alt tur engelleme ve kapasite kısıtlarını göstermektedir.

Mingozi, Giorgi ve Baldacci karar modeli

Mingozi, Giorgi ve Baldacci (1999) ÖDST-ARP için yeni bir 0-1 tamsayılı karar modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, dağıtım ve toplama yapılacak müşterilere ait yolların bulunmasını ve bu iki yolun bir ayrıt ile birleşimini içermektedir. Geliştirilen modele

ait küme tanımlamaları, parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda gösterildiği gibidir.

Kümeler

$$G_L = (L_0, A_L)$$

$$G_B = (B_0, A_B)$$

$$L_0 = L \cup \{0\}$$

$$B_0 = B \cup \{0\}$$

$$A_L = \{(i, j) : (i, j) \in A; i, j \in L_0\}$$

$$A_B = \{(i, j) : (i, j) \in A; i, j \in B_0\}$$

$$A_0 = \{(i, j) : (i, j) \in A; i \in L, j \in B_0\}$$

Parametreler

c_l : $l \in L \cup B$ yolunun maliyeti

d_{ij} : i . düğümden j . düğüme mesafe

Karar Değişkenleri

x_l : $l \in L$ yolu en iyi çözümde kullanılıyorsa 1,
diğer durumlarda 0

y_l : $l \in B$ yolu en iyi çözümde kullanılıyorsa 1,
diğer durumlarda 0

ξ_{ij} : $(i, j) \in A_0$ en iyi çözümde kullanılıyorsa 1,
diğer durumlarda 0

$$Enk\ z = \sum_{l \in L} c_l x_l + \sum_{l \in B} c_l y_l + \sum_{(i, j) \in A_0} d_{ij} \xi_{ij} \quad (4.24)$$

Kısıtlar

$$\sum_{l \in L_i} x_l = 1 \quad \forall i \in L, \quad (4.25)$$

$$\sum_{l \in B_j} y_l = 1 \quad \forall j \in B, \quad (4.26)$$

$$\sum_{l \in L_i^E} x_l - \sum_{j \in B_0} \xi_{ij} = 0 \quad \forall i \in L, \quad (4.27)$$

$$\sum_{l \in B_j^S} y_l - \sum_{i \in L} \xi_{ij} = 0 \quad \forall j \in B, \quad (4.28)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_0} \xi_{ij} = M \quad (4.29)$$

$$x_l \in \{0,1\}, \quad l \in L, \quad y_l \in \{0,1\}, \quad l \in B, \quad \xi_{ij} \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in A_0 \quad (4.30)$$

Kısıt (4.25) ve (4.26) dağıtım ve toplama müşterilerinin her rotada yalnızca bir kez ziyaret edilebileceğini gösterir. (4.27) numaralı kısıt $i \in L$ ile biten G_L 'de uygun yolu içeren çözümün $i \in L$ ile başlayan A_0 ayrıtını kapsamaya zorlamaktadır. (4.28) numaralı kısıt $j \in B$ ile başlayan G_B 'de uygun yolu içeren çözümün $i \in L$ ve $j \in B$ 'den oluşan (i,j) ayrıtının çözümünü kapsamayı gerektirir. Kısıt (4.29) uygun çözümde M adet rota oluşmasını sağlamaktadır.

4.3. Çevreci Rotalama ve Yasal Zorunluluklar

Sanayi devrimiyle birlikte sanayileşme ve kentleşmenin artması, beraberinde çevresel sorunları da getirmiştir. Çevre sorunlarının artması ve doğal kaynakların hızla tükenmesi hem bireyler hem de hükümetler üzerinde tedbir alınması yönünde baskı oluşturmaktadır. Çevreci rotalama, rotalama problemlerine çözüm ararken çevresel faktörleri gözardı etmez. Lojistik yöneticilerinin karar verme süreçlerine çevre ile ilgili konuları da dâhil ederek bu alanda nasıl bir yol izlenmesi gerektiğini analiz etmeye yardımcı olur. İşletmelerin süreçlerini çevreyle bütünleşik hale getirmesinin bilinçli müşteriler kazanma, verilecek ödüller gibi farklı motivasyon kaynakları olmasına rağmen bazı işletmeler için sözkonusu motivasyon kaynakları yeterli olmamaktadır. Bu durumda çevreye olan etkilerin azaltılmasında bazı yasal zorunluluklar devreye girmektedir. Çevresel

faktörlerin her geçen gün önem kazandığı günümüzde, sistemlerini çevre ile uyumlu hale getiren işletmeler rakiplerine üstünlük sağlayabilir.

İnsanoğlu, varoluşundan bu yana çevresini ve doğal kaynakları kendi gereksinimleri doğrultusunda kullanmış, bu süreçte çevreyi etkilemiş ve çevreden de etkilenmiştir. Söz konusu ihtiyaçların karşılanması sürecinde gerek duyduğu hammaddelerin sağlanması, mal ve hizmetlerin üretimi-tüketimi ve daha sonra doğaya atık olarak aktarılması aşamalarının her birinde doğaya önemli ve geri dönülemez zararlar vermiş ve vermeye devam etmektedir. Bu zararların en başında “Küresel Isınma” ve “İklim Değişikliği” kavramları ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınma, insan tarafından atmosfere verilen gazların (karbondioksit, diazotmonoksit, metan, su buharı, kloroflorokarbon) sera etkisi yaratması sonucunda, dünya atmosferi ve okyanuslarının ortalama sıcaklıklarında belirlenen artışa verilen isimdir (<http://www.kureselisinma.org/>).

Küresel ısınmanın potansiyel etkileri açısından Türkiye riskli ülkeler arasındadır. Dolayısıyla küresel ısınmanın etkileri Türkiye’de de görülmeye başlanmıştır. Örneğin, Türkiye’nin 1951–2004 tarihleri arasındaki ortalama yıllık mevsimsel hava sıcaklık verilerine uygulanan regresyon analizinden Türkiye’de yaz mevsiminde hava sıcaklıklarında artış olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Türkiye’deki yağış miktarında da bir azalma söz konusudur (Apak ve Ubay, 2007). Dünyamızın yakın gelecekte sonu olabilecek kadar tehlikeli olan küresel ısınma eğer önlem alınmazsa birçok alanda felaketlere sebep olacaktır. Küresel ısınma sonrasında gerçekleşmesi beklenen olayların bazıları aşağıda sıralanmaktadır:

- İklim değişiklikleri
- Salgın hastalıklar
- Çölleşme
- Ekosistemin değişmesi
- Göç artışı
- Tatlı su kaynaklarında azalma
- Tarım faaliyetlerindeki ürünlerin maliyeti artması
- Okyanuslara kıyısı olan ülkeler su altında kalması
- Dünyada doğal afetlerin artması

İklim değışikliğinin önlenmesi sürecinde atılan önemli adımlardan biri Kyoto Protokolüdür. Kyoto Protokolü küresel ısınma ve iklim değışikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası tek çerçevedir ve Birleşmiş Milletler İklim Değışikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Bu protokolü imzalayan ülkeler, karbondioksit ve sera etkisine neden olan gazların salınımını azaltmaya veya bunu yapamıyorlarsa salınım ticareti yoluyla haklarını arttırmaya söz vermiştir. Ülkemiz 2009 yılında bu protokole dâhil olmuştur. Kyoto protokolü, özellikle gelişmiş ülkelerin sera gazı salınımlarını 2008-2012 yılları arasında 1990 seviyesinin ortalama %5 altına indirmesini öngörmektedir. Sera gazlarının en önemlileri, başta enbüyük katkıyı sağlayan su buharı (H₂O) olmak üzere, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazotmonoksit (N₂O) ve ozon (O₃) gazlarıdır. Kyoto Protokolünde, sera gazı salınımlarının azaltılmasına ilişkin çeşitli hedefler ve bu amaçla kullanılacak çeşitli esneklik mekanizmaları getirmiştir. Kyoto Protokolünde ülkelerin sunmuş oldukları azaltım hedeflerine ulaşabilmeleri için üç farklı “Esneklik Mekanizması” geliştirilmiştir (Türkeş, 2001):

1. Ortak Yürütme Mekanizması (Joint Implementation)
2. Temiz Kalkınma Mekanizması (Clean Development Mechanism)
3. Salınım Ticareti (Emission Trading)

Ortak Yürütme Mekanizması, protokolün 6.maddesinde düzenlenmiştir. Bu mekanizmaya göre salınım hedefi belirlemiş bir ülke, salınım hedefi belirlemiş diğeri bir ülkede, salınım azaltıcı projelere yatırım yaparsa salınım azaltma kredisi kazanır ve kazanılan bu krediler toplam hedeften düşölür. Temiz Kalkınma Mekanizması, protokolün 12.maddesinde düzenlenmiştir. Bu mekanizmaya göre salınım hedefi belirlemiş bir ülke, salınım hedefi belirlememiş az gelişmiş bir ülke ile işbirliğine giderek, o ülkede sera gazı salınımlarını azaltmaya yönelik projeler yaparsa sertifikalandırılmış salınım azaltma kredisi kazanır ve bu krediler toplam hedeften düşölür. Salınım Ticareti, protokolün 17.maddesinde düzenlenmiştir. Bu mekanizmaya göre salınım hedefi belirlemiş ülkelerin taahhüt ettikleri hedef indirimi tutturmak için, ilave olarak kendi aralarında salınım ticareti yapabilmelerine imkan tanınmaktadır.

Karayolu taşımacılığı, %85 ile ulaşım sektörü içinde en yüksek sera gazı salınımı kaynağı durumundadır. Karayolundan kaynaklanan salınım miktarı sürekli artış göstermeye

devam etmektedir. Şirketlerin yapacağı başarılı rotalamalar ile bu oranın düşürülmesi mümkündür. Bu noktada çevreci rotalama yaklaşımı devreye girmektedir. İzleyen bölümde ÖDST-ARP için geliştirilen çevreci rotalama yaklaşımından bahsedilmiştir.

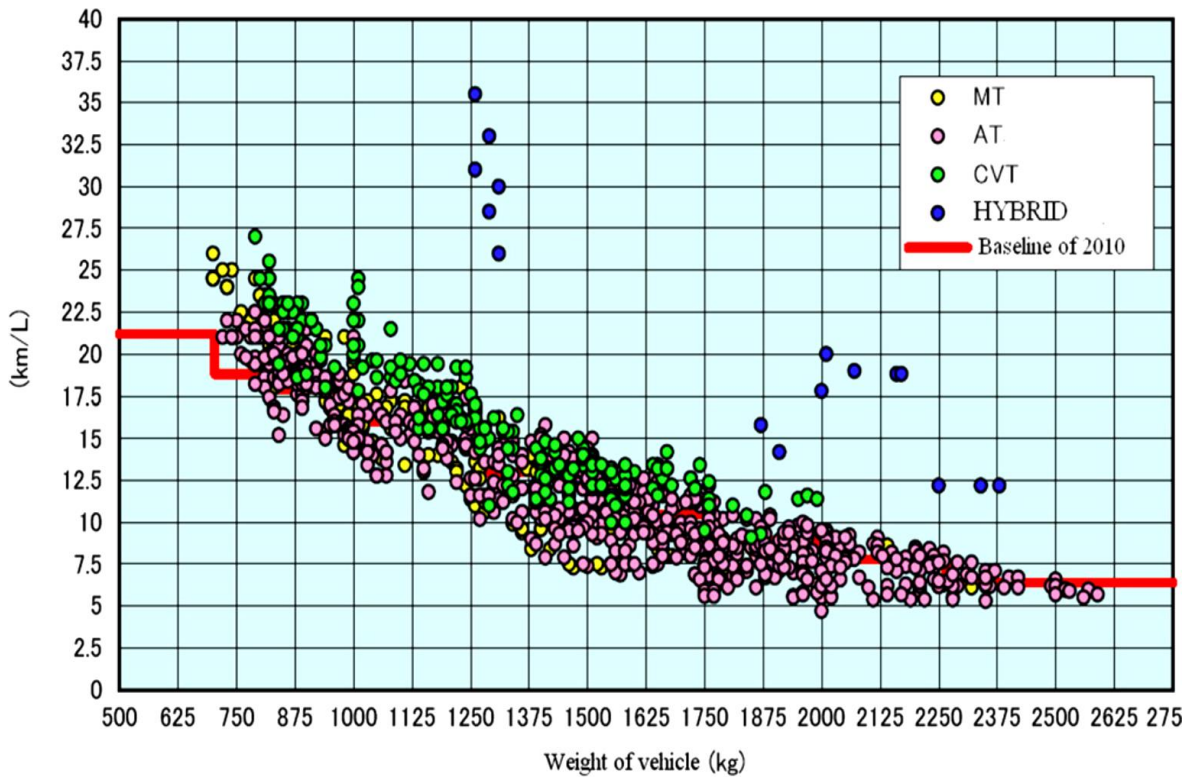
4.4. Çevreci Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi

Araç rotalama problemlerinde seyahat maliyeti birçok faktöre bağlıdır. Kara vd. 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada bu faktörleri iki başlık altında gruplandırmışlardır. Birinci grupta yer alan faktörler uzaklık, yük, hız, yol durumu, yakıt tüketim oranı, birim mesafedeki yakıt tüketimi, birim yakıt fiyatı vb. gibi seyahat rotasına doğrudan etki eden faktörlerdir. İkinci grupta yer alan faktörler ise araç amortisman gideri, bakım giderleri, sürücü ücretleri, vergi gibi seyahat rotası ile doğrudan bağlantısı bulunmayan giderlerdir. Özetle birinci grup faktörler yakıt tüketimine doğrudan etki ederler ve bu sebeple *değişken maliyet* veya *yakıt maliyeti* olarak adlandırılır. Diğer faktörler sabit tutulduğunda yakıt tüketimi güçlü biçimde yük ve mesafeye bağlıdır. Boş bir aracın değişken maliyeti aynı rotada ve aynı hızda seyahat ettikleri sürece daima tam dolu bir aracın değişken maliyetinden daha az olacaktır (Xiao vd., 2012).

Demir, Bektaş ve Laporte ise 2014 yılında yaptıkları çalışmada yakıt tüketimine etki eden faktörleri araç, çevre, trafik, sürücü ve operasyonel faaliyetler ile ilgili faktörler olmak üzere beş ana başlık altında toplamıştır. Söz konusu gruplandırmayı Ardekani vd. (1996), Bigazzi ve Bertini (2009), Demir vd. (2011) ve Alwakiel (2011)' nin çalışmalarını inceleyerek oluşturmuştur. Araç rotalama problemlerinin çeşitli türleri olmasına rağmen çoğu problem toplam seyahat mesafesini enküçükleyerek toplam maliyeti enküçüklemeyi amaçlar ve yakıt tüketimini dikkate almaz. Oysa hangi başlık altında yer alırsa alsın araç ağırlığının (aracın ağırlı ve taşınan yük) yakıt tüketimine etkisi olduğu açıktır.

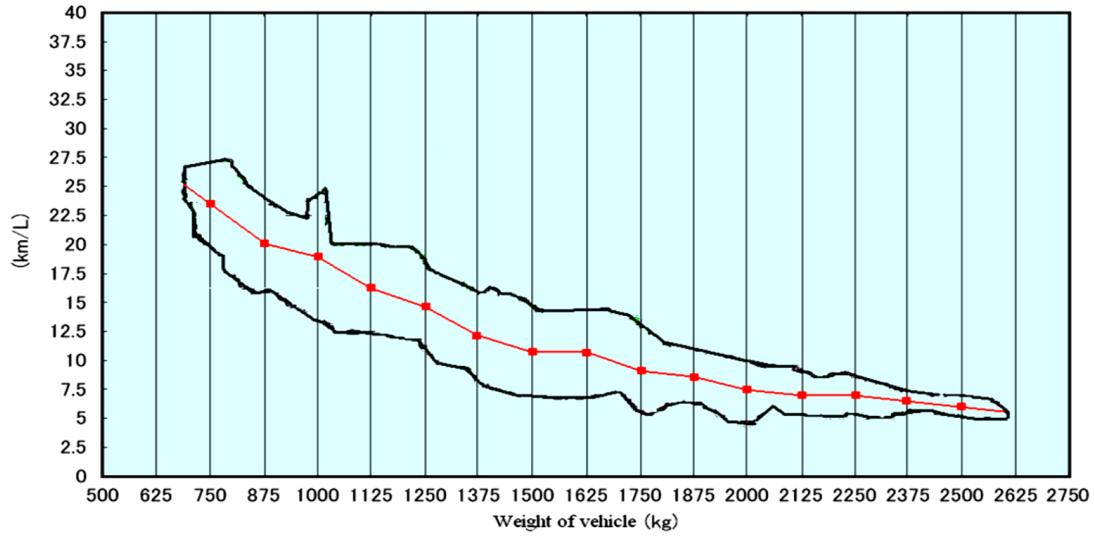
Yapılan çalışmada ÖDST-ARP için iki ayrı amaç fonksiyonu incelenmiştir. Amaçlardan ilki ARP'nin klasik amaç fonksiyonu olan toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi iken, ikinci amaç fonksiyonu katedilen yola ve aracın yüküne bağlı toplam yakıt tüketimi maliyetinin enküçüklenmesidir. Toplam yakıt tüketimi maliyetinin hesaplanmasında Xio vd. tarafından 2012'de literatüre sunulan amaç fonksiyonundan yararlanılmıştır.

Japonya Arazi, Altyapı, Ulaşım ve Turizm Bakanlığı tarafından yayınlanan rapora göre, seyahat boyunca birim yakıt miktarı (L) başına gidilen mesafe (km), Şekil 4.1’ de görüldüğü gibi aracın brüt ağırlığı ile güçlü bir ilişki içersindedir (Japanese Government Website, 2010).



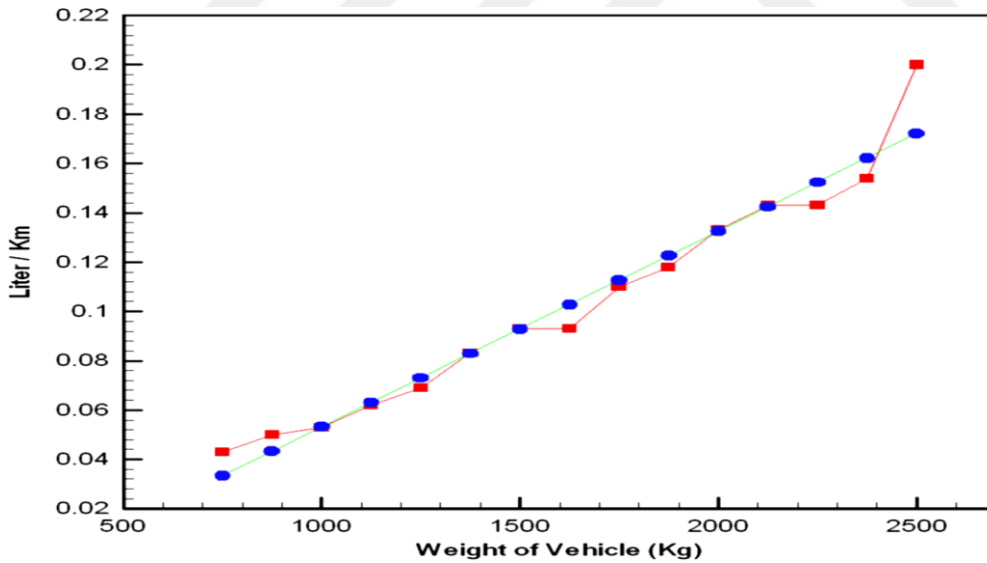
Şekil 4.1. Araç ağırlığının birim yakıt miktarı başına gidilen mesafeye etkisi (Japanese Government Website, 2010)

Aracın ağırlığı arttıkça belli bir yakıt miktarı (L) için gidilen mesafe (km) azalmaktadır. İlgili şekilden hareketle Şekil 4.2’de gösterilen kırmızı çizgi tahminlenmiştir.



Şekil 4.2. Kesikli noktaların tahmini değerleri (Japanese Government Website, 2010)

Şekil 4.2' den hareketle Şekil 4.3'te gösterilen yüke bağlı yakıt tüketim oranı (Fuel Consumption Rate- FCR) fonksiyonu elde edilmiştir. Burada X koordinatı aracın kg cinsinden ağırlığını, Y koordinatı ise L/km cinsinden FCR'yi gösterir.



Şekil 4.3. Önerilen bağıntı yoluyla elde edilen değerlerin gerçek veriler ile karşılaştırılması

Şekil üzerinde yer alan kırmızı kare ile işaretlenmiş noktaların birleştirilmesi ile oluşan kırmızı çizgi doğrudan Şekil 4.2'den elde edilmiştir. Mavi renkli yuvarlaklar noktaların birleştirilmesi ile oluşan mavi çizgi ise aracın brüt ağırlığı (X)' na bağlı FCR (Y)' yi açıklayan, $Y = 0000793X - 0,026$ doğrusal regresyon bağıntısı yardımıyla elde edilmiştir. Aracın brüt ağırlığı ve FCR arasındaki ilişkiyi temsil eden mavi çizgi bahsedilen

bağıntı yoluyla elde edilmiş olup, R^2 değeri 0,958'e eşittir. Buradan hareketle aracın brüt ağırlığı ve FCR arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu söylemek mümkündür (Xiao vd.,2012).

Aracın boş ağırlığı Q_0 ve aracın taşıdığı yük Q_1 ile gösterilmek üzere araç ağırlığı iki parçaya bölündüğünde FCR, aşağıda belirtildiği gibi Q_1 'e bağlı doğrusal bir fonksiyon olarak ifade edilebilir (Xiao vd., 2012).

$$\rho(Q_1) = \alpha(Q_0 + Q_1) + b \quad (4.31)$$

Araç kapasitesi yani aracın taşıyabileceği maksimum yük miktarı Q , araç tam dolu (full-load) iken FCR ρ^* ve araç boş iken (no-load) FCR ρ_0 ile gösterildiğinde, eşitlik (4.31)'i aracın tam yüklü ve yüksüz durumlarındaki FCR değerlerine karşılık gelen ρ^* ve ρ_0 hesabı için kullanmak mümkündür.

$$\rho_0 = \alpha(Q_0) + b \quad (4.32)$$

$$\rho^* = \alpha(Q_0 + Q) + b \quad (4.33)$$

$$\alpha = \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} \quad (4.34)$$

Dolayısıyla $\rho(Q_1)$ 'in hesaplanmasına ait eşitlik, eşitlik (4.35) şeklinde güncellenebilir. ρ^* ve ρ_0 parametrelerinin her biri, aynı ve sabit olduğu varsayılan şartlar altında aracın tam-dolu ağırlığını ve boş ağırlığını kullanarak eşitlik (4.34) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\rho(Q_1) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_1 \quad (4.35)$$

Herhangi bir i noktasına uğradıktan sonra herhangi bir j noktasına giden aracın hareketi (i, j) ayrıtı üzerinde gerçekleşmiştir ve i 'den j 'ye gitme maliyeti aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$C_{\text{fuel}}^{ij} = C_0 \rho_{ij} d_{ij} \quad (4.36)$$

Eşitlik (4.36)'da yer alan C_0 , birim yakıt maliyetini gösterir. Eşitlikte yer alan d_{ij} , i 'den j 'ye olan uzaklığı gösterirken ρ_{ij} ise (i, j) ayrıtı üzerindeki FCR'ye karşılık gelmektedir.

Rota üzerinde yar alan ve ziyaret edilmesi gereken müşteriler r ile gösterildiğinde araca ait yakıt tüketim maliyeti eşitlik (4.37) yardımıyla hesaplanabilir. Burada x_{ij} , (i, j) ayrıtı ziyaret edildiyse 1, diğer durumlarda 0 (sıfır) değerini alan 0-1 tamsayı değişkenidir.

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r C_{\text{fuel}}^{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r C_0 \rho_{ij} d_{ij} x_{ij} \quad (4.37)$$

ρ_{ij} değeri toplam yakıt maliyetine etki etmektedir ve bu değer dağıtım veya toplama yapılacak müşterilerin ziyaret sırasında yapılacak iyileştirmelerle eniyilenebilir. Eşitlikte yer alan y_{ij} , i 'den j 'ye taşınan yüke karşılık gelmektedir.

$$\rho_{ij} = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} y_{ij} = \rho_0 + \alpha y_{ij} \quad (4.38)$$

Yakıt tüketim maliyetinin hesaplanmasına ilişkin eşitlik;

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r C_0 d_{ij} (\rho_0 x_{ij} + \alpha y_{ij}) \quad (4.39)$$

şeklindedir.

Klasik ARP'de yakıt tüketim maliyetinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik (4.39) çalışmada ele alınan ÖDST-ARP'ne uyarlanarak modelin amaç fonksiyonunda yer almıştır.

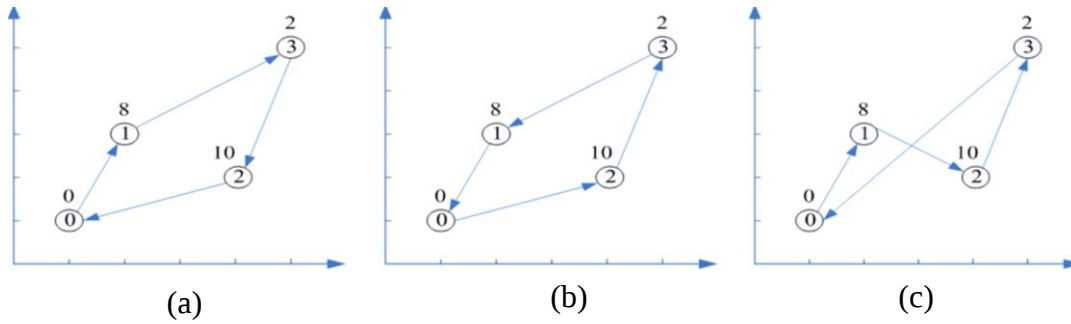
Rotalama problemlerinde çözüm aranırken yakıt tüketim maliyetinin karar verme sürecine nasıl etki ettiğini küçük boyutlu bir örnek problem üzerinden açıklamak mümkündür (Xiao vd., 2012). Söz konusu örnek problemde aynı araç tarafından hizmet

alacak üç müşteri bulunmaktadır. Araç rotası depoda başlayıp depoda bitmektedir. Araç tam-dolu iken $\rho^* = 2$ ve araç boş iken $\rho_0 = 1$ ve araç kapasitesi $Q = 20$ olduğu varsayılmıştır. Müşterilere ait koordinat bilgileri ve araçlar tarafından dağıtımı yapılacak talep miktarları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üç müşterili örnek problem

	Müşteri No	Koordinat	Talep
Depo	0	(1,1)	0
Müşteri 1	1	(2,3)	8
Müşteri 2	2	(4,2)	10
Müşteri 3	3	(5,5)	2

Müşterilere ait koordinat bilgileri yardımıyla oklid uzaklıkları hesaplandıktan sonra enküçük toplam seyahat mesafesini verecek rotayı bulmak mümkündür. Şekil 4.4’te örnek probleme ait toplam seyahat mesafesi ve toplam yakıt tüketimi değerleri hesaplanmış üç adet örnek rota gösterilmiştir. Örneğin Şekil 4.4.(a)’da yer alan rota, aracın depodan (0) çıkması ile başlar ve sırasıyla 1,3 ve 2 nolu müşterileri ziyaret ettikten sonra depoya dönmesi ile son bulur.



Şekil 4.4. Örnek probleme ilişkin rotalar

Toplam seyahat mesafesinin hesaplanmasında müşteriler arası uzaklıklardan faydalanılırken, toplam yakıt tüketimi maliyeti hesaplanırken eşitlik (4.39) kullanılmıştır. Elde edilen amaç fonksiyonu değerleri aşağıda yer alan Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Örnek probleme ait hesapsal sonuçlar

Şekil 4.4.(a) da yer alan				Şekil 4.4.(b) da yer alan				Şekil 4.4.(c) da yer alan			
rota				rota				rota			
(i,j)	d_{ij}	Q_{ij}	C_{fuel}^{ij}	(i,j)	d_{ij}	Q_{ij}	C_{fuel}^{ij}	(i,j)	d_{ij}	Q_{ij}	C_{fuel}^{ij}
0,1	2,236	20	4,472	0,2	3,162	20	6,325	0,1	2,236	20	4,472
1,3	3,606	12	5,769	2,3	3,162	10	4,743	1,2	2,236	12	3,578
3,2	3,162	10	4,743	3,1	3,606	8	5,048	2,3	3,162	10	3,479
2,0	3,162	0	3,162	1,0	2,236	0	2,236	3,0	5,657	0	5,657
<i>mesafe</i> = 12.166				<i>mesafe</i> = 12.166				<i>mesafe</i> = 13.291			
C_{fuel} = 18.147				C_{fuel} = 18.352				C_{fuel} = 17.185			

Çizelge incelendiğinde Şekil 4.4(a) ve şekil 4.4.(b) de değerlendirilen rotalara ait toplam seyahat mesafesi değerleri eşit olup, 12.166'dır. Rotalara ait toplam seyahat mesafesi değeri aynı olmasına karşın müşteri ziyaret sıralarının farklı olması sebebiyle toplam yakıt tüketimi maliyetleri farklı değerler almıştır. Şekil 4.4(c) de yer alan rota ise 13.291 değeriyle önceki iki rotadan daha yüksek değerde toplam seyahat mesafesine sahip olmasına karşın, 17.185 değeri ile önceki rotalara göre daha düşük toplam yakıt tüketimi maliyetine sahiptir. Örnek problem aracılığı ile daha açık şekilde görülmüştür ki araç rotalama problemlerinde yakıt tüketimi maliyetinin amaç fonksiyonu olarak değerlendirilmesi önemlidir.

4.4.1. Matematiksel model

Problemi serim kuramı kavramları aracılığı ile tanımlamak mümkündür. Önceki bölümlerde de açıklandığı gibi serim kuramında düğüm ve ayrıtlar bulunmaktadır. V , G seriminin düğümler kümesi A ise G seriminin ayrıtlar kümesi olsun. İkili düğüm kümeleri ayrıtları oluşturmaktadır. Bu durumda matematiksel olarak G serimi (V,A) olarak tanımlanır.

Problemde yer alan müşteriler kümesi, düğümlere karşılık gelmektedir. İki farklı müşteri kümesi olduğu için iki farklı düğüm kümesi tanımlamak gerekecektir. Dağıtım müşterileri kümesi $L = \{1, \dots, N\}$ ile, toplama müşterileri kümesi ise $B = \{N + 1, \dots, N + M\}$ ile ifade edilmiştir. Depo $\{0\}$ ile gösterildiğinde, problem $V_0 = \{0\} \cup \{1, \dots, N\} \cup \{N + 1, \dots, N + M\}$ düğüm kümesi ve A ayrıt kümesi ikililerinden oluşan bir $G = (V_0, A)$ serimi ile ifade edilebilir. Geliştirilen karar modeline ait notasyonlar şöyledir:

Kümeler

$$V_0 = \{0\} \cup \{1, \dots, N\} \cup \{N + 1, \dots, N + M\}$$

$$L = \{1, \dots, N\}$$

$$B = \{N + 1, \dots, N + M\}$$

$$V = V \setminus \{0\}$$

$$L_0 = L \cup \{0\}$$

$$B_0 = B \cup \{0\}$$

$$G = (V_0, A)$$

Parametreler

K	Araç sayısı
Q	Araç kapasitesi
a_i	Dağıtım müşterileri talebi, ($i=1, \dots, N$)
b_i	Toplama müşterileri arzı, ($i=N+1, \dots, N+M$)
d_{ij}	i. müşteriden j. müşteriye uzaklık, ($i, j=0, \dots, N+M$)
C_0	birim yakıt maliyeti
ρ_0	Araç boş (no-load) iken yakıt tüketim oranı (FCR)
ρ^*	Araç tam dolu (full-load) iken yakıt tüketim oranı (FCR)
α	Yüke bağlı yakıt tüketim oranı katsayısı

Karar Değişkenleri

u_{ik}	: i. dağıtım yapılacak müşteri k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, diğer durumlarda 0; $i \in L_0$.
v_{jk}	: j. toplama yapılacak müşteri k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, diğer durumlarda 0; $j \in B_0$.
x_{ijk}	: k aracı i. müşteriden j. müşteriye geçerse 1, diğer durumlarda 0; $i, j \in V_0$.
y_{ijk}	: k aracı ile i. müşteriden j. müşteriye taşınan yük.

$$Enk\ z = \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \sum_{k \in K} C_0 d_{ij} (\rho_0 x_{ijk} + \alpha y_{ijk}) \quad (4.40)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i \in L} a_i u_{ik} \leq Q \quad \forall k \in K, \quad (4.41)$$

$$\sum_{k \in K} u_{ik} = 1 \quad \forall i \in L, \quad (4.42)$$

$$u_{0k} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (4.43)$$

$$\sum_{i \in B} b_i v_{ik} \leq Q \quad \forall k \in K, \quad (4.44)$$

$$\sum_{k \in K} v_{ik} = 1 \quad \forall i \in B, \quad (4.45)$$

$$v_{0k} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (4.46)$$

$$\sum_{i \in L_0} x_{ijk} = u_{jk} \quad \forall j \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.47)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = v_{jk} \quad \forall j \in B_0, \quad \forall k \in K, \quad (4.48)$$

$$\sum_{j \in V_0} x_{ijk} = u_{ik} \quad \forall i \in L_0, \quad \forall k \in K, \quad (4.49)$$

$$\sum_{j \in B_0} x_{ijk} = v_{ik} \quad \forall i \in B, \quad \forall k \in K, \quad (4.50)$$

$$\sum_{i \in L_0} \sum_{j \in B_0} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (4.51)$$

$$\sum_{j \in L_0} y_{jik} - \sum_{j \in V_0} y_{ijk} = a_i \quad \forall i \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.52)$$

$$y_{ijk} \leq (Q - a_i) x_{ijk} \quad \forall i \in L_0, \forall j \in L, \forall k \in K, \quad (4.53)$$

$$y_{ijk} \geq a_j x_{ijk} \quad \forall i \in L_0, \forall j \in L, \forall k \in K, \quad (4.54)$$

$$\sum_{j \in B_0} y_{jik} - \sum_{j \in V} y_{ijk} = b_i v_{ik} \quad \forall i \in B, \forall k \in K, \quad (4.55)$$

$$y_{ijk} \leq (Q - b_j) x_{ijk} \quad \forall i \in B, \forall j \in B_0, \forall k \in K, \quad (4.56)$$

$$y_{ijk} \geq b_j x_{ijk} \quad \forall i \in B, \forall j \in B_0, \forall k \in K, \quad (4.57)$$

$$\sum_{i \in L} \sum_{j \in B_0} y_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, \quad (4.58)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V_0, \quad \forall k \in K, \quad (4.59)$$

$$u_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.60)$$

$$v_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in B, \quad \forall k \in K, \quad (4.61)$$

Kısıt (4.40) amaç fonksiyonu olup taşınan yüke ve mesafeye bağlı olarak toplam yakıt tüketim maliyetini gösterir. (4.41) ve (4.44) numaralı kısıtlar dağıtım ve toplama yapılacak noktalar için araç kapasitesinin aşılamayacağını gösterir. (4.42) ve (4.45) numaralı kısıtlar ise dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin her birinin yalnız ve mutlaka bir k aracı tarafından ziyaret edileceğini gösterir. Kısıt (4.43) ve (4.46) dağıtım merkezinden (depo) K adet aracın çıkmasını ve bu araçların dağıtım merkezine (depo) geri dönmesini sağlar. (4.47) numaralı kısıt, j . dağıtım noktası k aracı tarafından ziyaret edilmişse, söz konusu j . dağıtım noktasına depodan veya i . dağıtım noktalarının yalnızca birinden geldiğini gösterir. Kısıt (4.48) ise j . toplama noktası k aracı tarafından ziyaret edilmişse, söz konusu j . toplama noktasına i . dağıtım veya toplama noktalarının yalnızca birinden gelineceğini gösterir. (4.49) numaralı kısıt, k aracı i . dağıtım noktasını ziyaret etmişse, i noktasından yalnızca bir adet j noktasına gidebileceğini ve j noktasının depo dâhil tüm müşteriler kümesi içinden seçilebileceğini gösterir. Kısıt (4.50) ise k aracı i . toplama noktasını ziyaret etmişse, i noktasından yalnızca bir adet j noktasına gidebileceğini ve j noktasının depo veya toplama yapılacak müşteriler kümesi içinden seçilebileceğini gösterir. Kısıt (4.51) her rota için dağıtım yapılan müşterilerden toplama yapılan müşterilere yalnızca tek bir geçiş olmasını sağlar. (4.52)-(4.54) numaralı kısıtlar dağıtım yapılacak müşteriler için alttut engelleme kısıtlarıdır. (4.55)-(4.57) numaralı kısıtlar ise toplama yapılacak müşteriler için alttut engelleme kısıtlarıdır. Kısıt (4.58) ise dağıtım yapılacak müşterilerden toplama yapılacak müşterilere geçiş yapılırken k aracının taşıdığı yükün “0” (sıfır) olmasını garanti eder.

Tez çalışmasında incelenen ÖDST-ARP’ye ait matematiksel modelin oluşturulmasında Goetschalckx ve Jacobs-Blecha (1989)’nın homojen filolu ÖDST-ARP için önermiş olduğu matematiksel modelden faydalanılmıştır. Ancak yararlanılan modeldeki bazı kısıtların ele alınan problem için uygun veya anlaşılır olmadığı görülmüştür. Tez çalışmasında ele alınan problemde yük önemli bir faktördür. Bu sebeple literatürde yer alan (4.10), (4.11), (4.62) ve (4.63) numaralı kısıtlarda kısıtlarda değişikliğe gidilmiştir. Bu

sayede hem klasik ÖDST-ARP hem de çevreci ÖDST-ARP için kullanılabilir bir matematiksel model elde edilmiştir.

Kısıt (4.47) ve (4.48)'nin elde edilmesi: Kısıt (4.10) ziyaret edilen her müşteriye yalnızca ve mutlaka bir araç tarafından gelineceğini gösterir (Goetschalckx ve Jacobs-Blecha, 1989). Söz konusu kısıdın matematiksel gösterim sebebiyle anlaşılması güçtür. Bu sebeple kısıt “eğer” ifadesiyle verilen iki farklı duruma göre ayrılmış ve küme tanımlamaları yardımıyla sadeleştirilmiştir. Dağıtım ve toplama müşterilerinin aynı kısıtta değerlendirilmesi sebebiyle, dağıtım ve toplama noktalarına geliş yapabilecek müşteri kümesi aynı kümede ($i = 0, \dots, N + M$) tanımlanmıştır. Çalışmada önerilen matematiksel modelde problem yapısı gereği toplama yapılacak müşterilerden dağıtım yapılacak müşterilere geçiş sağlanamamaktadır yani herhangi bir dağıtım noktasına herhangi bir toplama noktasından gelmesi mümkün olmamaktadır. Probleme özgü bu durum kısıt (4.10) yerine, dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin ayrı ayrı ele alındığı kısıt (4.47) ve (4.48) ile çözülmüştür. Burada amaç, kısıtların daha rahat anlaşılması ve düğümlere yapılacak girişlerin hangi kümelerden olabileceğinin açık şekilde gösterilmesidir. Kısıdın bu şekilde ikiye ayrılması modelin kodlama aşamasında da büyük kolaylık sağlamıştır.

$$\sum_{i=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} u_{jk}, & \text{eğer } j = 1, \dots, N, \\ v_{jk}, & \text{eğer } j = N + 1, \dots, N + M, j = 0, \end{cases} \quad \forall k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in L_0} x_{ijk} = u_{jk} \quad \forall j \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.47)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = v_{jk} \quad \forall j \in B_0, \quad \forall k \in K, \quad (4.48)$$

Kısıt (4.47), j . dağıtım noktası ($j \in L$), k aracı tarafından ziyaret edilmişse, söz konusu j . dağıtım noktasına depodan veya i . dağıtım noktalarının yalnızca birinden ($i \in L_0$) geldiğini gösterir. Kısıt (4.48), j . toplama noktası ($j \in B_0$) k aracı tarafından ziyaret edilmişse söz konusu j . toplama noktasına i . dağıtım veya toplama noktalarının yalnızca birinden ($i \in V$) gelinebileceğini gösterir.

Kısıt (4.49) ve (4.50)'nin elde edilmesi: Kısıt (4.11) ziyaret edilen her müşteriden yalnızca ve mutlaka bir aracın ayrılacağını gösterir (Goetschalckx ve Jacobs-Blecha, 1989). Dağıtım ve toplama noktalarından gidilebilecek müşteri kümesinin aynı kümede ($j = 0, \dots, N + M$) tanımlanması sebebiyle kısıdın anlaşılması güçtür. Çalışmada önerilen matematiksel modelde problem yapısı gereği toplama yapılacak müşterilerden dağıtım yapılacak müşterilere geçiş sağlanamamaktadır yani herhangi bir toplama noktasından herhangi bir dağıtım noktasına gidilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle (4.11) numaralı kısıt dağıtım ve toplama yapılacak müşteriler için ayrı ayrı ele alınmış ve (4.49) ve (4.50) numaralı kısıtlar oluşturulmuştur.

$$\sum_{j=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} u_{ik}, & \text{eğer } i = 0, 1, \dots, N, \\ v_{ik}, & \text{eğer } i = N + 1, \dots, N + M, \end{cases} \quad \forall k, k = 1, \dots, K, \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in V_0} x_{ijk} = u_{ik} \quad \forall i \in L_0, \quad \forall k \in K, \quad (4.49)$$

$$\sum_{j \in B_0} x_{ijk} = v_{ik} \quad \forall i \in B, \quad \forall k \in K, \quad (4.50)$$

Kısıt (4.49), i . dağıtım noktası ($i \in L_0$), k aracı tarafından ziyaret edilmişse, söz konusu i noktasından yalnızca bir adet j noktasına gidilebileceğini ve j noktasının depo dâhil tüm müşteriler kümesi ($j \in V_0$) içinden seçilebileceğini gösterir. Kısıt (4.50) ise, k aracı i . toplama noktasını ziyaret etmişse ($i \in B$), i noktasından yalnızca bir adet j noktasına geçişin mümkün olduğunu ve j noktasının depo veya toplama yapılacak müşteriler kümesi ($j \in B_0$) içinden seçilebileceğini gösterir.

Kısıt (4.52) ve (4.55)'nin elde edilmesi: Matematiksel modelde yapılan bir diğer değişiklik alttut engelleme kısıtlarında yapılmıştır. Goetschalckx ve Jacobs-Blecha (1989) tarafından geliştirilen ÖDST-ARP modeli müşteriler arası taşınan yükün hesaplanmasına ilişkin kısıt içermemektedir. Bu sebeple modelde oluşabilecek alttutları engelleme amacıyla Keçeci tarafından 2008 yılında ÖDST-ARP için geliştirilen alttut engelleme kısıtlarından yararlanılmıştır (Kısıt (4.54)-(4.60)). Söz konusu kısıtlarda yer alan eşitsizlikler yardımıyla alttutların engellenmesinin yanı sıra müşteriler arası taşınabilecek yük miktarlarının da

hesaplanması amaçlanmıştır. Ancak modelin kısıt kontrolü ve kodlama aşamasında bazı kısıtların önerilen çevreci ÖDST-ARP modele uygun olmadığı görülmüştür. Keçeci (2008) tarafından önerilen alttur engelleme kısıtlarında, kullanılan her araç dağıtım yapılacak son müşteriyi ziyaret ettikten sonra mutlaka en az bir toplama yapılacak müşteriyi ziyaret eder. Tez kapsamında önerilen çevreci ÖDST-ARP'ye ait matematiksel modelde ise kullanılan araç dağıtım yapılacak müşterileri ziyaret ettikten sonra depoya dönebilmektedir.

Keçeci (2008), tarafından sunulan ve değişikliğe gidilen ilgili alttur engelleme kısıtları, kısıt (4.62) ve (4.63)'de verilmiştir. Dağıtım müşterileri $L = \{1, \dots, N\}$ ile, toplama müşterileri ise $B = \{N + 1, \dots, N + M\}$ ile gösterilmiştir. q_i , i . noktanın talebini, $k = \{1, \dots, K\}$ araç sayısını göstermektedir.

$$\sum_{j \in L \cup \{0\}} y_{jik} - \sum_{j \in L \cup B \cup \{0\}} y_{ijk} = q_i \quad \forall i \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.62)$$

$$\sum_{j \in B \cup \{0\}} y_{ijk} - \sum_{j \in L \cup B} y_{jik} = q_i \quad \forall i \in B, \quad \forall k \in K, \quad (4.63)$$

Kısıtlarda yer alan eşitsizlikler kontrol edildiğinde, toplama yapılacak müşteriler için tanımlanan alttur engelleme kısıtında (4.63) eşitsizliğin sağ tarafının 0'dan (sıfır) büyük bir sayı değeri alırken sol tarafının 0 (sıfır) değeri aldığı durumların olabildiği görülmüştür. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; her toplama noktası yalnızca ve mutlaka bir araç tarafından ziyaret edilmelidir ancak her araç mutlaka bir toplama noktasını ziyaret etmeyebilir. Bu sebeple k aracı ile i . müşteriden j . müşteriye geçiş olmadığı durumlarda eşitsizliklerin sağ tarafını 0 (sıfır) değerini almaya zorlayacak değişikliklerin yapılması gereklidir. Bu amaçla ilgili eşitsizliğe, toplama noktaları için v_{ik} , 0-1 tamsayı değişkenleri eklenerek sözkonusu eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır. b_i , değerinin parametre, v_{ik} 'nin ise 0-1 değişken olması sebebiyle kısıttaki doğrusallık korunmuştur.

$$\sum_{j \in L_0} y_{jik} - \sum_{j \in V_0} y_{ijk} = a_i \quad \forall i \in L, \quad \forall k \in K, \quad (4.52)$$

$$\sum_{j \in B_0} y_{ijk} - \sum_{j \in V} y_{jik} = b_i v_{ik} \quad \forall i \in B, \quad \forall k \in K, \quad (4.55)$$

Kısıt (4.52), dağıtım yapılacak müşterilere ait alttur engelleme kısıtları içerisinde yerilirken, kısıt (4.55) toplama yapılacak müşterilere ait alttur engelleme kısıtları içerisinde yerilmektedir.

4.4.2. Boyut analizi

Boyut analizi, matematiksel modeldeki kısıt ve değişken sayısını ve buna bağlı olarak incelenen problemin zorluk seviyesini gösterir. Başlangıç düğümü hariç dağıtım yapılacak müşterisi sayısının m , başlangıç düğümü hariç toplama yapılacak müşteri sayısının n ve araç sayısının k ile gösterildiği örnek problem için yapılan boyut analizi sonuçları Çizelge 4.3.'de gösterilmiştir. Boyut analizinde kullanılacak küme tanımlamaları örnek problem için şu şekildedir :

$$L = 10,$$

$$B = 5,$$

$$K = 3,$$

$$L_0 = 11,$$

$$B_0 = 6,$$

$$V_0 = 16.$$

Çizelge 4.3. Matematiksel modele ilişkin boyut analizi

Kısıt	İndisler	Değişken Sayısı	Kısıt Sayısı
$\sum_{i \in L} a_i u_{ik} \leq Q$	$\forall k \in K$	k	k
$\sum_{k \in K} u_{ik} = 1$	$\forall i \in L$	i	m
$\sum_{i \in B} b_i v_{ik} \leq Q$	$\forall k \in K$	k	k
$\sum_{k \in K} v_{ik} = 1$	$\forall i \in B$	i	n
$\sum_{i \in L_0} x_{ijk} = u_{jk}$	$\forall j \in L, \forall k \in K$	$j * k$	$m * k$
$\sum_{i \in V} x_{ijk} = v_{jk}$	$\forall j \in B_0, \forall k \in K$	$j * k$	$(n + 1) * k$
$\sum_{j \in V_0} x_{ijk} = u_{ik}$	$\forall i \in L_0, \forall k \in K$	$i * k$	$(m + 1) * k$
$\sum_{j \in B_0} x_{ijk} = v_{ik}$	$\forall i \in B, \forall k \in K$	$i * k$	$n * k$
$\sum_{i \in L_0} \sum_{j \in B_0} x_{ijk} = 1$	$\forall k \in K$	k	k
$\sum_{j \in L_0} y_{jik} - \sum_{j \in V_0} y_{ijk} = a_i$	$\forall i \in L, \forall k \in K$	$i * k$	$m * k$
$y_{ijk} \leq (Q - a_i) x_{ijk}$	$\forall i \in L_0, \forall j \in L, \forall k \in K$	$i * j * k$	$(m + 1) * m * k$
$y_{ijk} \geq a_j x_{ijk}$	$\forall i \in L_0, \forall j \in L, \forall k \in K$	$i * j * k$	$(m + 1) * m * k$
$\sum_{j \in B_0} y_{jik} - \sum_{j \in V} y_{ijk} = b_i v_{ik}$	$\forall i \in B, \forall k \in K$	$i * k$	$n * k$
$y_{ijk} \leq (Q - b_j) x_{ijk}$	$\forall i \in B, \forall j \in B_0, \forall k \in K$	$i * j * k$	$n * (n + 1) * k$
$y_{ijk} \geq b_j x_{ijk}$	$\forall i \in B, \forall j \in B_0, \forall k \in K$	$i * j * k$	$n * (n + 1) * k$
$\sum_{i \in L} \sum_{j \in B} y_{ijk} = 0$	$\forall k \in K$	k	k
Değişken	İndisler	Değişken Sayısı	
x_{ijk}	$\forall i, j \in V_0, \forall k \in K$	$i * j * k$	$(m + n + 1) * (m + n + 1) * k$
y_{ijk}	$\forall i, j \in V_0, \forall k \in K$	$i * j * k$	$(m + n + 1) * (m + n + 1) * k$
u_{ik}	$\forall i \in L_0, \forall k \in K$	$i * k$	$(m + 1) * k$
v_{jk}	$\forall j \in B_0, \forall k \in K$	$j * k$	$(n + 1) * k$
Toplam kısıt sayısı	$k(2m^2 + 2n^2 + 5m + 5n) + m + n$		
Toplam değişken sayısı	$k(2m^2 + 2n^2 + 4mn + 5m + 5n + 4)$		

Buna göre dağıtım yapılacak müşteri sayısının (m) 10, toplama yapılacak müşteri sayısının (n) 5, toplam araç sayısının (k) 3 olduğu bir problemde **1008** adet kısıt bulunmaktadır. Toplam değişken sayısı ise verilen parametreler için; **1587**'dir.

4.4.3. Küçük boyutlu test problemlerinin çözümü

ÖDST-ARP problemine ait model ilk olarak küçük boyutlu test problemleri üzerinde test edilmiş ardından büyük boyutlu problemlerin çözümü aranmıştır. Problemin zorluk seviyesi sebebiyle problem boyutu büyüdükçe kesin çözüm veren yöntemlerin yetersiz kaldığı görülmüştür. Küçük boyutlu problemler için gezgin satıcı probleminde kullanılan 15 müşteriye (<https://people.sc.fsu.edu>) ait rota bilgisinden yararlanılmış ve farklı boyutlardaki problemler bu örnek probleminden türetilmiştir. Çizelge 4.4’de farklı boyutlardaki küçük test problemlerinin GAMS yazılımının CPLEX 9.0 çözücüsü ile elde edilen sonuçları verilmiştir. “L” sütunu dağıtım yapılacak müşteri sayısını, “B” sütunu toplama yapılacak müşteri sayısını göstermektedir. Probleme ait toplam müşteri sayısı “N” sütununda yer alırken, araç sayısı “K” sütununda yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Küçük boyutlu test problemleri

L	B	N	K	Eniyi çözüm değeri	Süre (sn)
3	3	6	2	74,55	0,011
5	3	8	2	80,63	0,012
5	3	8	3	90,84	0,014
5	5	10	2	96,82	0,017
10	5	15	3	-	-

Dağıtım yapılacak müşteri sayısının 10, toplama yapılacak müşteri sayısının 5 ve kullanılacak araç sayısının 3 olduğu örnek problem için GAMS yazılımı CPLEX 9.0 çözücüsüyle yaklaşık dört saatlik sürede çözüm alınamamıştır. ÖDST-ARP için literatürde yer alan en küçük boyutlu test problemi 20 dağıtım, 5 toplama yapılacak müşteri içermekte olup, kullanılan araç sayısı 8’dir (Goeschalckx ve Jacobs, 1989). Bu çalışmada incelenen amaç fonksiyonu kullanılarak test problemleri gibi büyük boyutlu problemlerin çözümünde kabul edilebilir sürelerde sonuç elde edebilmek amacıyla tavlama benzetimi metasezgiseli önerilmiştir. Problem çözümünde kullanılan tavlama benzetimi algoritması C# programlama dilinde kodlanmıştır.

5. ÇEVRECİ ÖNCE DAĞIT SONRA TOPLA ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN TAVLAMA BENZETİMİ İLE ÇÖZÜMÜ

Çevreci rotalama kapsamında önerilen ÖDST-ARP'ye ait matematiksel modelin çözüm süresi, problemin boyutuna bağlı olarak arttığı için geliştirilen model etkin bir şekilde kullanılamamıştır. Gerçek hayat problemlerine daha benzer olan büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel ve meta sezgisel yaklaşımlar geliştirmek gerekli hale gelmiştir. Çalışmanın bu bölümünde büyük boyutlu problemlerin çözümüne olanak sağlaması amacıyla kullanılan tavlama benzetimi algoritması detaylı olarak anlatılmış ve algoritma etkinliği literatürden alınan test problemleri üzerinde incelenmiştir. İncelenen test problemleri öncelikle tek amaçlı yapıda ele alınmış ve toplam seyahat mesafesini enküçükleme amacı için elde edilen değerler literatürde bilinen eniyi çözüm değerleri ile karşılaştırılmıştır. Problemlerin tek amaçlı yapıda incelenmesinin ardından amaçlar ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi yardımıyla birleştirilmiş ve test problemleri amaçlara atanan farklı ağırlık katsayıları için çözdürülmüştür.

5.1.Tavlama Benzetimi

Metasezgiseller, zor ve karmaşık problemleri kabul edilir bir süre içerisinde çözerek iyi çözümler üretebilmeleri nedeniyle araç rotalama problemlerinin çözümünde tercih edilir hale gelmiştir. Kesin çözüm yöntemlerinden farklı olarak metasezgisel yöntemler, elde edilen çözümün eniyiliğini garanti etmez.

Literatüre Kirkpatrick (Kirkpatrick vd., 1983) tarafından tanıtılan tavlama benzetimi doğadan ilham alan bir metasezgisel yöntemdir. Madde ilk olarak önce ısıtılır ve ardından yavaş yavaş soğutulur. Yapılan ısıtma-soğutma işlemleri ile daha güçlü bir kristal yapı elde etmek amaçlanmaktadır. Bu noktada maddenin ne kadar ısıtıldığı ve hangi hızla soğutulduğu önem kazanmaktadır. Yapılacak hızlı bir soğutma veya yeterince ısıtmama işlemi kristalin kusurlu oluşmasına sebep verebileceği gibi bulunulan her sıcaklık seviyesinde dengeye ulaşmayı da zorlaştıracaktır.

Herhangi bir problemin çözümünde TB Algoritmasının kullanılması için bazı parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler: başlangıç sıcaklığı, her sıcaklıktaki iterasyon sayısı, soğutma fonksiyonu ve algoritmayı durdurma kriteridir. Başlangıç sıcaklığı bir girdi parametresidir. Sıcaklık, kötü çözümlerin kabul edilme olasılığını kontrol etmek için kullanılır. İterasyon sayısı, her sıcaklıkta üretilen çözümlerin sayısıdır. Soğutma fonksiyonu, bir önceki iterasyon sıcaklığına bağlı olarak mevcut iterasyondaki sıcaklığı belirler. Başlangıç sıcaklığı ile birlikte iterasyon sayısı ve soğutma fonksiyonu, soğutma çizelgesi olarak adlandırılır. Bu çizelge, çözüm kalitesinde veya yakınsama oranında büyük etkiye sahiptir. Her sıcaklık değişiminde elde edilen çözüm, çok sayıda ardışık sıcaklık değişimlerinde değişmiyor ise TB Algoritması durdurulur (Güner ve Altıparmak, 2003).

Tavlama benzetiminin ilk adımı bir başlangıç çözüm oluşturulmasıdır. Ardından her iterasyonda komşu çözümlerin oluşturulması ile algoritma işleyişi devam eder. Oluşturulan komşu çözüm amaç fonksiyonu değeri eldeki çözümden daha iyi olduğu sürece oluşturulan komşu çözümler her zaman kabul edilir. Komşu çözüm amaç fonksiyonu değerinin eldeki çözümden daha kötü olduğu durumlarda ise komşu çözümün kabul edilmesi o anki sıcaklık değeri ve amaç fonksiyonundaki artış yardımıyla hesaplanan kötü çözüm kabul olasılık fonksiyonuna bağlıdır. Kötü çözümlerin kabul edilmesiyle çözüm uzayındaki farklı noktalarda arama yaparak yerel eniyiden kaçınmak amaçlanmaktadır. Kötü çözümlerin kabul edilme olasılığı Boltzmann dağılımı ile şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$$

Algoritma ilerledikçe amaç fonksiyonunda iyileşme sağlamayan değişimlerin kabul olasılığı azalır. Oluşturulan komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri ile eldeki çözüme karşılık gelen amaç fonksiyonu değerinin farkı ΔE ile gösterilmektedir. Eldeki çözüm sıcaklık değeri ise T ile gösterilmektedir. Komşu çözümün kabul edilmesinin ardından eldeki eniyi çözüm ve komşu çözüm arasında bir karşılaştırma yapılır. Komşu çözümün eldeki eniyi çözümden daha iyi olması durumunda komşu çözüm eniyi çözüm olarak alınır ve bu işlem iterasyon sayısı sağlanana kadar devam eder. İterasyon sayısının sağlanmasının ardından sıcaklık belirlenen bir soğutma fonksiyonuna göre güncellenir. Algoritma durdurma koşulu olarak belirlenen koşul gerçekleştiğinde algoritma son bulur.

5.2. Kullanılan Algoritma ve Çözümlerin Üretilmesi

TB, temel parametrelerin belirlenmesiyle başlar. Buna ek olarak başlangıç çözümün nasıl elde edileceği ve komşu çözüm bulmada izlenecek hareket mekanizması kullanıcı tarafından belirlenmelidir. Genel olarak geliştirilen TB'nin çalışma esası Şekil 5.1'de verilmiştir.

TB parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla denemeler yapılmıştır. Yapılan denemelere örnek olarak başlangıç sıcaklığı, 1000, 5000, 10000, 15000, 20000, soğutma oranı 0.8, 0.9, 0.95, 0.99, 0.999, 0.9999, aynı sıcaklık değerinde iterasyon sayısı 1, 5, 10, 15 ve son olarak olasılık kabul değeri 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, verilebilir. Denemeler sonucunda TB'nin başarılı olduğu parametre değerleri $T = 10000$, $\alpha = 0,9999$, $T_{min} = 10$, $iterasyon = 10$, $r = 0,3$ olarak belirlenmiştir.

Metasezgisel yaklaşımlarda, başlangıç çözümünün iyi seçilmesi, çözüm uzayında daha iyi sonuçlara daha kısa zamanlarda ulaşılabilmesi açısından önemlidir. Literatürde bazı problemlerde başlangıç çözümünün bulunması için sezgisel bir yöntem başvurulurken, bazı çalışmalarda ise başlangıç çözüm rastgele üretilmiştir. Çalışmada kullanılan TB algoritmasında başlangıç çözüm bulunurken toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi ve toplam FCC'nin enküçüklenmesi amaçları için ayrı sezgisel yöntemler geliştirilmiştir.

Toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi amacıyla başlangıç çözümün elde edilmesi: Başlangıç çözüm-1 algoritması toplam seyahat mesafesinin enküçüklenildiği ÖDST-ARP için çözüm aranırken kullanılır ve ilk olarak dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin talep miktarlarına göre büyükten küçüğe sıralanması ile başlar. Enbüyük dağıtım talebi (a_i) ve toplama talebi (b_i) miktarına sahip müşteriler ilk araca atanır. Bu işlem araç sayısı (K) kadar tekrar eder. Ardından kalan müşteriler için en yakın komşuluk sezgiseli uygulanır. Başlangıç çözümün izleyen ve son adımı ise dağıtım ve toplama yapılacak müşteriler arasındaki bağlantıların yapılmasıdır. Başlangıç çözümü oluşturulurken ilk adımda enbüyük talepli müşterilere öncelik verilmesi ile test problemlerinde aynı örnek problem için, aynı sayıda ve farklı kapasitelerdeki araçlarla başlangıç çözüm bulmada esneklik sağlanması amaçlanmıştır.

```

Başlangıç parametrelerini belirle:  $T \leftarrow 10000$ ;  $T_{min} \leftarrow 10$ ;  $\alpha \leftarrow 0,9999$ ;  $KomsuSay \leftarrow 10$ 
Uygun başlangıç çözüm yöntemini seç  $S_{bas} \in S$  ve başlangıç çözüm hesapla  $f(S_{bas})$ ;

 $S_{mevcut} \leftarrow S_{bas}$  ;  $f(S_{mevcut}) \leftarrow f(S_{bas})$ 
 $S_{eniyi} \leftarrow S_{bas}$  ;  $f(S_{eniyi}) \leftarrow f(S_{bas})$ 
while (  $T > T_{min}$  )
   $i \leftarrow 0$ 
  do
     $S_{komsu} = \text{RassalKomsuCozumUret}(S_{mevcut})$ 
    if (  $f(S_{mevcut}) > f(S_{komsu})$  )
       $S_{mevcut} \leftarrow S_{komsu}$ 
       $f(S_{mevcut}) \leftarrow f(S_{komsu})$ 
    else
       $r \leftarrow (0,1)$  aralığında olasılık kabul değerini belirle
       $\Delta \leftarrow f(S_{mevcut}) - f(S_{komsu})$ 
      if (  $\exp(-\frac{\Delta}{T}) > r$  )
         $S_{mevcut} \leftarrow S_{komsu}$ 
         $f(S_{mevcut}) \leftarrow f(S_{komsu})$ 
      end if
    end if
  end if
  if (  $f(S_{eniyi}) > f(S_{mevcut})$  )
     $S_{eniyi} \leftarrow S_{mevcut}$ 
     $f(S_{eniyi}) \leftarrow f(S_{mevcut})$ 
  end if
   $i \leftarrow i + 1$ 
  while (  $i < KomsuSay$  )
     $T \leftarrow T * \alpha$ 
  end while .

```

Şekil 5.1. Tavlama benzetimine ait pseudo kod

Toplam FCC'nin enküçüklenmesi amacıyla başlangıç çözümün elde edilmesi:

Başlangıç çözüm-2, toplam yakıt tüketim maliyetinin enküçüklediği ÖDST-ARP için çözüm aranırken kullanılır ve ilk olarak dağıtım ve toplama yapılacak müşterilerin talep miktarlarına göre büyükten küçüğe sıralanması ile başlar. Enbüyük dağıtım talebi (a_i) miktarına sahip müşteriler ilk araca atanır. Bu işlem araç sayısı (K) kadar tekrar eder. Ardından kalan müşteriler için $(\frac{talep}{mesafe})$ değeri hesaplanır. Yakıt tüketimi maliyetinin hesaplanmasında ziyaret edilecek müşterilerin rotası belirlenirken hem mesafe hem de müşterilerin talep miktarı yani aracın taşıyacağı yük miktarı önem kazanmaktadır. Dolayısı ile başlangıç çözüm-1'de olduğu gibi kalan müşterilerde en yakın komşuluk sezgiseli yerine hesaplanan oran yardımıyla atama yapılır. Araçlara ilk müşteriler atandıktan sonra kalan dağıtım müşterileri belirlenen orana göre büyükten küçüğe sıralanır ve bu sıralamaya göre araçlara atanır. Toplama yapılacak müşterilerde başlangıç çözüm bulma işlemi de tıpkı dağıtım müşterilerinde olduğu gibi talebe göre (b_i) yapılan büyükten küçüğe sıralama ile başlar. Enbüyük talep miktarına sahip müşteriler araçlara sırasıyla atanır. Kalan toplama müşterilerinin atamasında ise toplama müşterilerinin $(\frac{talep}{mesafe})$ oranına göre bu sefer küçükten büyüğe sıralamadan faydalanılır. Başlangıç çözümün son adımı ise dağıtım ve toplama yapılacak müşteriler arasındaki bağlantıların yapılmasıdır.

Başlangıç çözümün ardından komşuluk yapısının belirlenmesi gereklidir. TB'de mevcut bir çözümden yeni bir çözüm üretilirken algoritmanın izleyeceği yola hareket mekanizması denir. Literatür araştırıldığında TB için genellikle değiştirme veya ekleme hareket mekanizmasının kullanıldığı görülmüştür. Çalışmada geliştirilen TB'de hareket mekanizması olarak değiştirme (swap) kullanılmıştır. Problem çözümü permütasyon gösterimi ile ifade edilmiştir. Permütasyon gösterimi, her kromozom sırada konum belirten numara karakter dizisinden oluşur. Çözüm gösteriminde depo sıfır ile belirtilmiştir. Araçların depodan çıkması ve depoya geri dönmesi gerektiği için çözüm gösteriminin ilk ve son sırasında 0 rakamı yer almalıdır. Diğer rakamların müşterileri temsil ettiği çözüm gösterimi için her iki sıfırın arasında kalan rakamlar bir aracın hizmet verdiği müşterileri sırasıyla soldan sağa doğru temsil eder. Dağıtım yapılacak müşteri sayısı " m ", toplama yapılacak müşteri sayısı " n ", araç sayısı ise " k " ile ifade edilmiştir. Çözüm gösteriminin uzunluğu serimdeki düğüm sayısı $(m+n+1)$ ve araç sayısının (k) toplanması $(m+n+k+1)$ ile belirlenir. Buna göre $(m+n+k+1)$ çözüm gösteriminin uzunluğuna sahip bir problem için;

rastgele birbirinden farklı 2 ile $(m+n+k)$ arasında iki farklı sayı üretilir. Gösterimde üretilen sayılara denk gelen sıralardaki rakamların yerleri değiştirilir. Üç dağıtım, iki toplama yapılacak müşteri ve iki aracın olduğu bir örnek çözüm gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir.

0	2	3	5	0	1	4	0
---	---	---	---	---	---	---	---

(a)

0	2	3	4	0	1	5	0
---	---	---	---	---	---	---	---

(b)

Şekil 5.2. Mevcut çözüm (a) ve komşu çözüm (b) gösterimi

Şekil 5.2 (a)’da verilen çözüm gösterimi rotaya depodan başlayan homojen araçlardan birincisinin sırasıyla 2 ve 3 numaralı dağıtım müşterilerini ziyaret ettikten sonra 5 numaralı toplama müşterisini ziyaret ederek depoya döndüğünü gösterir. İkinci araç ise 1 numaralı dağıtım müşterisini ziyaret ettikten sonra 4 numaralı toplama müşterisini ziyaret ederek depoya döner. 2 araç ve 6 düğüm içeren bir mevcut çözüm için 2 ile 7 arasında rassal olarak seçilen iki sayı 4 ve 7 olsun. Çözüm gösteriminde bu sayılara denk gelen sırasıyla 5 ve 4’ün yeri değiştirilir. Şekil 5.2 (b)’de ilgili komşu çözüm gösterilmiştir. Komşu çözüm değerlendirilirken araçlardan en az birinde kapasite kısıdı sağlanmıyorsa, komşu çözüm ataması yapılmadan mevcut çözüm üzerinden yeni bir komşu çözüm aranmıştır.

Komşu çözüm bulunduktan sonra komşu çözüm ve eniyi çözüme ait amaç fonksiyonları karşılaştırılmıştır. Komşu çözüm amaç fonksiyon değerinin eniyi çözümden daha iyi olduğu durumlarda komşu çözüme ait rota bilgisi ve amaç fonksiyon değeri eniyi rota ve eniyi amaç fonksiyonu değeri olarak atanmıştır. Komşu çözüm amaç fonksiyonu değeri eniyi çözümden daha kötü ise mevcut çözüm ile karşılaştırılmış ve mevcut çözümden daha iyi olması halinde mevcut çözüm olarak atanmıştır. Aksi durumda mevcut çözümden daha kötü olan komşu çözüme şans tanınmış ve kabul olasılığı şartının sağlanması durumunda mevcut çözüm olarak atanmıştır. Eşitliğin sağlanmaması durumunda mevcut çözüm değiştirilmez. On iterasyonda bir sıcaklık güncellenir. Sıcaklık değerinin düşürülmesinde $T_{i+1} = T_i * \alpha$ şeklinde doğrusal bir soğutma fonksiyonu kullanılmıştır. Algoritma durdurma kriteri minimum sıcaklık değerine ulaşılmasıdır.

5.3. Problem Çözümü İçin Geliştirilen Program

Tez kapsamında geliştirilen çok amaçlı ÖDST-ARP’de öncelikle amaçların ayrı ayrı ayrı enküçüklenmesi için çözüm aranmıştır. Küçük boyutlu problemlerde çözüm elde edilmesine karşın problem boyutu büyüdükçe GAMS yazılımının yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sebeple, büyük problemlerde makul sürelerde sonuç elde edebilmek amacıyla TB metasezgiselinin kullanıldığı bir program geliştirilmiştir.

Geliştirilen programda kullanıcıya kolaylık sağlamak amacıyla parametre ve veri girişlerine olanak sağlayan bir arayüz tasarlanmıştır (Şekil 5.3).

Şekil 5.3. Geliştirilen programa ait arayüz

TB algoritmasının işleyişi için yerine getirilmesi gereken ilk adım çözülecek probleme ilişkin verilerin programa tanıtılmasıdır. İlgili veriler sırasıyla; dağıtım ve toplama yapılacak müşteri düğüm sayısı, araç kapasitesi, araç sayısı, boş araç ağırlığı ve birim yakıt fiyatıdır (C_0) (Şekil 5.4).

Vehicle/Customer Parameters	
Number of Customer for Supply	
Number of Customer for Demand	
Vehicle Capacity	
Max. Number of Vehicle	
Weight of Empty Vehicle	
Cost per km (M0)	
Unit Fuel Cost (C0)	

Şekil 5.4. Problem veri girişi sayfası

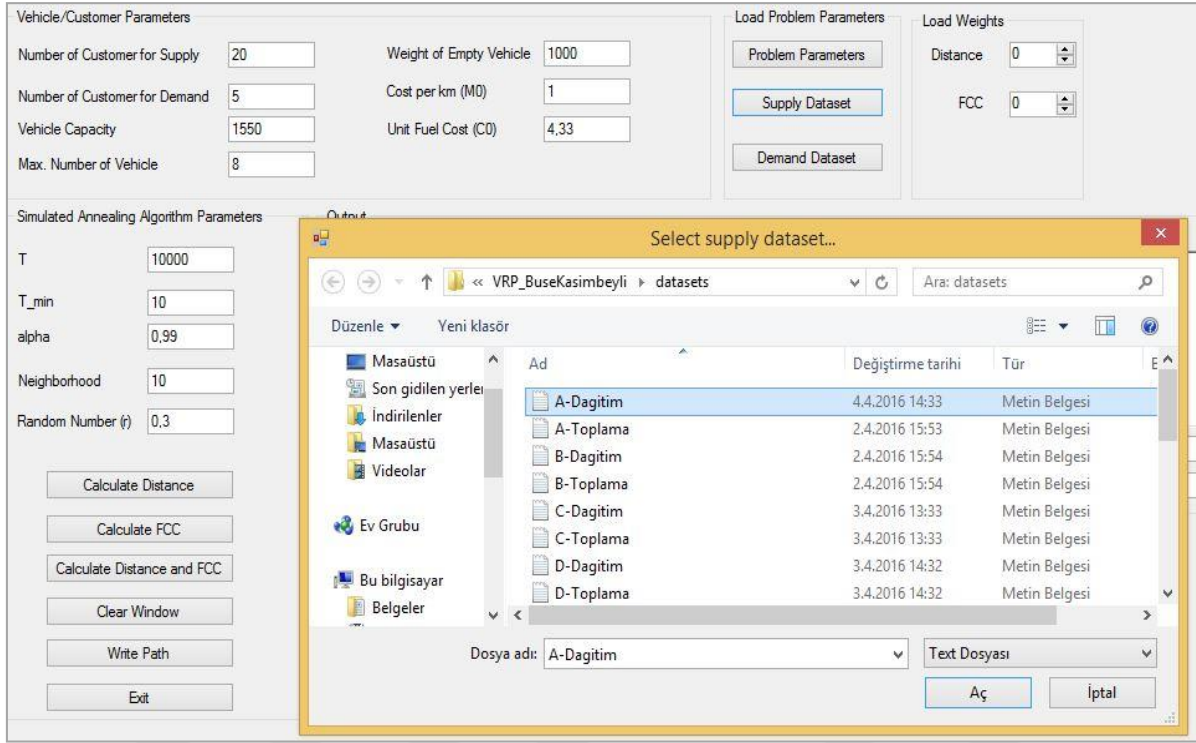
Problem verilerinin girilmesinden sonra TB'ye özgü parametrelerin kullanıcı tarafından programa tanıtılması gereklidir. Bu parametreler sırasıyla; başlangıç sıcaklığı (T), son sıcaklık (T_{min}), soğutma oranı (α), belirli bir sıcaklıkta kaç iterasyon yapılacağı yani kaç komşu çözüm taranacağı (Neighborhood) ve olasılık kabul değeri (r) dir. Bu noktada belirlenmesi gereken bir konu da sıcaklık düşürme fonksiyonunun nasıl olacağıdır. Çalışmada sıcaklığın azaltılmasında $T_{i+1} = T_i * \alpha$ şeklinde bir soğutma fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 5.5'de kullanıcının TB algoritmasına ait verileri gireceği arayüz gösterilmektedir.

Simulated Annealing Algorithm Parameters	
T	
T_min	
alpha	
Neighborhood	
Random Number (r)	

Şekil 5.5. Tavlama benzetimi veri girişi sayfası

Parametre girişleri tamamlandığında tüm bu parametrelerin “Load Problem Parameters (Problem Parametrelerini Yükle)” başlığı altında bulunan “Problem Parameters (Problem Parametreleri)” butonu aracılığı ile programa okutulması gereklidir. İşlem başarılı olduysa program, “Problem parameters were loaded (Problem parametreleri yüklendi)” uyarısı verir. Dolayısıyla kullanıcı tarafından ekranda bu ifadenin görülmesi önemlidir. Ardından çözümü yapılacak test problemine ait literatürden alınan koordinat ve talep bilgilerinin okutulması gereklidir. Program bu bilgileri tanımlanan dosyadan dağıtım ve

toplama müşterileri için ayrı ayrı okur. Şekil 5.6'da A1 test problemine ait dağıtım ve toplama müşterilerin koordinat ve taleplerinin okutulmasına ilişkin örnek gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Müşteri koordinat ve talep verileri girişi

Çözüm aranacak probleme ait tüm verilerin programa girilmesinden sonra kullanıcı problem çözümünde kullanılacak amacı seçer. Programda aynı problem iki ayrı amaç için çözdürülebilir: “Toplam mesafenin enküçüklenmesi” ve “toplam yakıt tüketimi maliyetinin (Fuel Consumption Cost - FCC)” enküçüklenmesi. Toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi için “Calculate Distance”, toplam FCC’nin enküçüklenmesi için “Calculate FCC” seçilir. Toplam mesafeyi enküçüklemek başlangıçta toplam FCC’yi de enküçükleyecek gibi görünse de ÖDST-ARP problemine özgü olarak araç yüküne bağlı olarak FCC değişeceğinden, iki farklı amaç için farklı çözümler mümkündür.

“Calculate Distance and FCC” seçeneği ile her iki amacı birlikte ele alarak iki amaç fonksiyonu değerleri toplamı enküçüklenecek şekilde problem çözdürülebilir. Gerekirse amaç fonksiyonlarına ağırlık da verilebilir Şekil 5.7’de A1 test problemine ait sonuçların ekrana yazdırılmış hali verilmiştir. Örnek problem çözümünde toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Program çıktısı olarak bu amacı enküçükleyen rota ve bu

rotaya karşı gelen ikinci amaç fonksiyonu değeriyle birlikte saniye cinsinden çözüm süresi verilmektedir.

The screenshot displays the 'Programa ilişkin çözüm ekranı' (Solution screen related to the program). It is divided into several sections:

- Vehicle/Customer Parameters:**
 - Number of Customer for Supply: 20
 - Number of Customer for Demand: 5
 - Vehicle Capacity: 1550
 - Max. Number of Vehicle: 8
 - Weight of Empty Vehicle: 1000
 - Cost per km (M0): 1
 - Unit Fuel Cost (C0): 4,33
- Load Problem Parameters:**
 - Problem Parameters (button)
 - Supply Dataset (button)
 - Demand Dataset (button)
- Load Weights:**
 - Distance: 0
 - FCC: 0
- Simulated Annealing Algorithm Parameters:**
 - T: 10000
 - T_min: 10
 - alpha: 0,9999
 - Neighborhood: 10
 - Random Number (r): 0,3
 - Buttons: Calculate Distance, Calculate FCC, Calculate Distance and FCC, Clear Window, Write Path, Exit
- Output:**
 - Initial Solution:**
 - 1-> 0-10-3-23-0: Distance Cost => 30859,8482418467, FCC Cost => 14824,6587193748
 - 2-> 0-9-16-5-22-0: Distance Cost => 41521,1161010629, FCC Cost => 19137,6193415814
 - 3-> 0-17-19-7-21-0: Distance Cost => 62376,029137041, FCC Cost => 24724,6701451135
 - 4-> 0-13-2-6-24-0: Distance Cost => 50195,1000242324, FCC Cost => 20348,5905725223
 - 5-> 0-14-18-15-25-0: Distance Cost => 57285,6743873504, FCC Cost => 24130,357553078
 - Best Solution:**
 - 1-> 0-8-20-7-5-23-0: Distance Cost => 42904,2597441246, FCC Cost => 25305,799213514
 - 2-> 0-19-17-21-0: Distance Cost => 24583,22500528, FCC Cost => 11508,4682451982
 - 3-> 0-4-15-12-25-0: Distance Cost => 30425,8190565634, FCC Cost => 16024,1858678049
 - 4-> 0-6-0: Distance Cost => 10758,4281379763, FCC Cost => 1241,46343576771
 - 5-> 0-16-2-13-0: Distance Cost => 29735,8289760725, FCC Cost => 8767,90444051566
 - Best Cost Distance:** 229885,645391639
 - Best Cost Fuel Consumption:** 100644,575499786
 - Best Cost Distance and FCC:** 0
 - Computation Time:** 8,7660519
- Write Best Results to File:**
 - Number of Execution: (dropdown)
 - File Name: (text input)
 - Radio buttons: Distance, Fuel Consumption Cost (FCC), Distance and Fuel Consumption Cost
 - Write Best Results to .txt File (button)

Şekil 5.7. Programa ilişkin çözüm ekranı

Çözüm yönteminin metasezgisel bir algoritma olması sebebiyle programı çok sayıda çalıştırmanın çözüm kalitesini artırma ihtimali bulunmaktadır. Bu sebeple çözüm aranan problemi aynı şartlar altında birden fazla koşturmak için arayüzde belirtilen bölüme istenilen tekrar sayısı girilmelidir. “Number of Execution (Tekrar Sayısı)” ve “File Name (Dosya Adı)” alanları sırasıyla tekrar sayısının ve dosya adının girileceği alanlardır. Bu işlemlerin ardından “Write Best Results to File (Sonuçları Dosyaya Yazdır)” butonu ile bulunan çözümler belirlenen klasöre kullanıcı tarafından tanımlanan dosya ismi ile kaydedilir (Şekil 5.8).

Şekil 5.8. Sonuçların dosyaya yazdırılması

Dosyaya yazdırılan sonuçlarda, araçlara ait rotalar ve amaç fonksiyonu değerleri ayrı ayrı hesaplanmakta ve ilgili araç rotası satırına yazdırılmaktadır. Çizelge 5.1’de A1 test problemine ait program çıktısı örneği görülmektedir

Çizelge 5.1. A1 test problemi için bulunan çözüm

Araç No	Rota						Toplam Mesafe	Toplam FCC	
1	0	13	2	16	0		29735,83	8929,33	
2	0	8	20	7	5	23	0	42904,26	25305,79
3	0	1	14	18	0			35882,23	14383,88
4	0	10	3	22	0			16130,01	8732,32
5	0	4	15	12	25	0		30425,82	16024,18
6	0	6	0					10758,42	1241,46
7	0	19	17	21	0			24583,22	11508,46
8	0	11	9	24	0			39465,85	18569,29
							229885,64	104,694	

Çizelge 5.1’de yer alan bir numaralı araç rotası depoda başlayıp sırasıyla 13, 2 ve 16 numaralı dağıtım yapılacak müşterilerin ziyaret edilmesinin ardından depoda son bulur. İlgili araç rotasına ait toplam mesafe değeri 29735,83 km olup, aynı rotaya karşı gelen toplam FCC değeri 8929,33 TL olarak hesaplanmıştır.

5.4. Test Problemlerine İlişkin Sayısal Sonuçlar

Çevreci bakış açısıyla ele alınan ÖDST-ARP'nin çözümü için kullanılan tavlama benzetimi algoritmasının etkinliği literatürden alınan örnekler üzerinden test edilmiştir. Problem çözümünde öncelikle enküçük mesafe ve enküçük toplam yakıt tüketimi amaçlarının ayrı ayrı eniyilenmesi için çözüm aranmıştır. İzleyen adımda ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılarak amaçlar birlikte ele alınmış ve amaçlar arasındaki ödünleşmeler değerlendirilmiştir.

5.4.1. Toplam yakıt tüketiminin enküçüklenmesine ilişkin sonuçlar

Çalışmada Goeschalckx ve Jacobs (1989) tarafından önerilen test problemleri kullanılmıştır. Problemlerde müşterilerin x koordinatları $[0, 2400]$ arasında, y koordinatları ise $[0, 3200]$ arasında düzgün dağılıma uymaktadır. Depo koordinatları tüm test problemleri için aynıdır ve $(12000, 16000)$ merkezde bulunmaktadır. Müşteriler arası uzaklıklar verilen koordinatlar aracılığıyla Öklid uzaklığına göre belirlenmektedir. Test problemleri 14 ana problem ve bu problemlerde araç sayısı ve kapasitesi üzerinde yapılan değişiklikler ile elde edilmiş alt problemlerden oluşmaktadır. Çalışma kapsamında, literatürde bulunan 62 test problemi içerisinde 43 adet test problemi seçilmiştir. İncelenen test problemlerinin özellikleri Ek Açıklamalar-A' da verilmiştir.

TB algoritmasının etkinliği Goeschalckx ve Jacobs (1989) tarafından önerilen test problemleri üzerinde test edilmiş ve toplam seyahat mesafesini enküçükleme amacı için elde edilen sonuçlar literatürdeki bilinen eniyi değerler (Brandão, 2006) ile karşılaştırılmıştır. Ardından problem, araç yüküne ve yola bağlı toplam yakıt tüketimi maliyetinin (FCC) enküçüklenmesi amacıyla çözdürülmüş ve her iki amaç için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çizelge 5.2'de literatürde bulunan test problemlerinin geliştirilen program aracılığıyla toplam seyahat mesafesini enküçükleme amacı için çözdürülmesinden elde edilen değerler ile literatürde bilinen eniyi değerler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2. Toplam seyahat mesafesini (Z_1) enküçükleyen model için test problemlerinin sonuçları

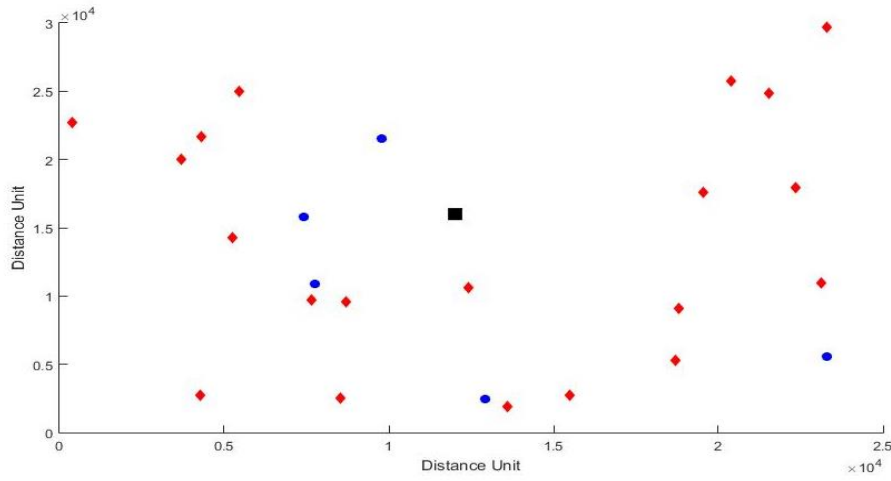
No.	İsim	N	L	B	Q	K	Literatür En İyi Değer	Z_1	% Fark	Z_2	Süre (sn)
1	A1	25	20	5	1550	8	229,886	229,886	0.00	104,694	11.2
2	A2	25	20	5	2550	5	180,119	180,119	0.00	107,807	14.3
3	A3	25	20	5	4050	4	163,405	163,405	0.00	119,781	13.8
4	A4	25	20	5	4050	3	155,796	155,796	0.00	121,095	18.0
5	B1	30	20	10	1600	7	239,080	239,080	0.00	117,542	25.1
6	B2	30	20	10	2600	5	198,048	198,492	0.22	113,671	22.7
7	B3	30	20	10	4000	3	169,372	169,372	0.00	127,644	21.0
8	C1	40	20	20	1800	7	249,448	255,329	2.36	147,935	30.1
9	C2	40	20	20	2600	5	215,020	215,020	0.00	147,961	31.8
10	C3	40	20	20	4150	5	199,346	200,586	0.62	162,511	28.2
11	C4	40	20	20	4150	4	195,366	197,509	1.10	158,627	34.1
12	D1	38	30	8	1700	12	322,530	322,530	0.00	146,375	38.3
13	D2	38	30	8	1700	11	316,709	316,709	0.00	150,807	38.1
14	D3	38	30	8	2750	7	239,479	239,479	0.00	135,043	36.9
15	D4	38	30	8	4075	5	205,832	211,310	2.66	234,615	31.0
16	E1	45	30	15	2650	7	238,880	243,489	1.93	150,260	31.8
17	E2	45	30	15	4300	4	212,263	218,221	2.81	256,993	38.2
18	E3	45	30	15	5225	4	206,659	213,134	3.13	240,051	29.8
19	F1	60	30	30	3000	6	263,173	277,101	5.29	307,608	41.3
20	F2	60	30	30	3000	7	265,213	276,783	4.36	297,047	42.0
21	F3	60	30	30	4400	5	241,120	259,720	7.71	319,794	39.6
22	F4	60	30	30	5500	4	233,861	251,562	7.57	327,360	40.3
23	G1	57	45	12	2700	10	306,305	316,956	3.48	205,288	41.4
24	G2	57	45	12	4300	6	245,441	247,039	0.65	292,903	38.3
25	G3	57	45	12	5300	5	229,507	234,051	1.98	320,212	36.5
26	G4	57	45	12	5300	6	232,521	248,809	7.00	336,076	41.3
27	G5	57	45	12	6400	5	221,730	239,471	8.00	356,665	41.1
28	G6	57	45	12	8000	4	213,457	230,359	7.92	338,697	36.6
29	H1	68	45	23	4000	6	268,933	282,844	5.17	334,480	46.2
30	H2	68	45	23	5100	5	253,365	273,452	7.93	354,281	43.9
31	H3	68	45	23	6100	4	247,449	278,760	12.65	401,124	73.8
32	H4	68	45	23	6100	5	250,221	266,125	6.36	361,349	44.6
33	H5	68	45	23	7100	4	246,121	273,201	11.00	395,884	47.3
34	H6	68	45	23	7100	5	249,135	271,855	9.12	361,016	45.9
35	I1	90	45	45	3000	10	350,246	373,756	6.71	291,976	81.7
36	I2	90	45	45	4000	7	309,943	343,072	10.69	431,247	74.5
37	I3	90	45	45	5700	5	294,507	337,718	14.67	493,761	90.8
38	I4	90	45	45	5700	6	295,988	334,275	12.94	441,473	86.3
39	I5	90	45	45	5700	7	301,226	345,267	14.62	460,997	76.9

40	J1	94	75	19	4400	10	335,006	362,332	8.16	436,432	85.9
41	J2	94	75	19	5600	8	310,417	337,815	8.83	463,923	70.7
42	J3	94	75	19	8200	6	279,219	331,896	18.87	504,762	68.3
43	J4	94	75	19	6600	7	296,533	340,877	14.95	519,472	73.9
Toplam							10677,88	11304,52	231.47	12097,24	1903.5
Ortalama							248,32	262,89	5.38	281,33	44.3

Problemlerde yer alan toplam müşteri sayısı Çizelge 5.2’de yer alan “N” sütununda verilmiştir. Dağıtım yapılacak müşteri sayısı “L” sütununda yer alırken, toplama yapılacak müşteri sayısı “B” sütununda yer almaktadır. “Q” araç kapasitesini, “K” araç sayısını göstermektedir. Test problemlerine ait toplam seyahat mesafesi değerleri " Z_1 " sütunu altında sıralanırken, aynı rotalara karşı gelen yol ve araç yüküne bağlı FCC değerleri " Z_2 " sütununda yer almaktadır.

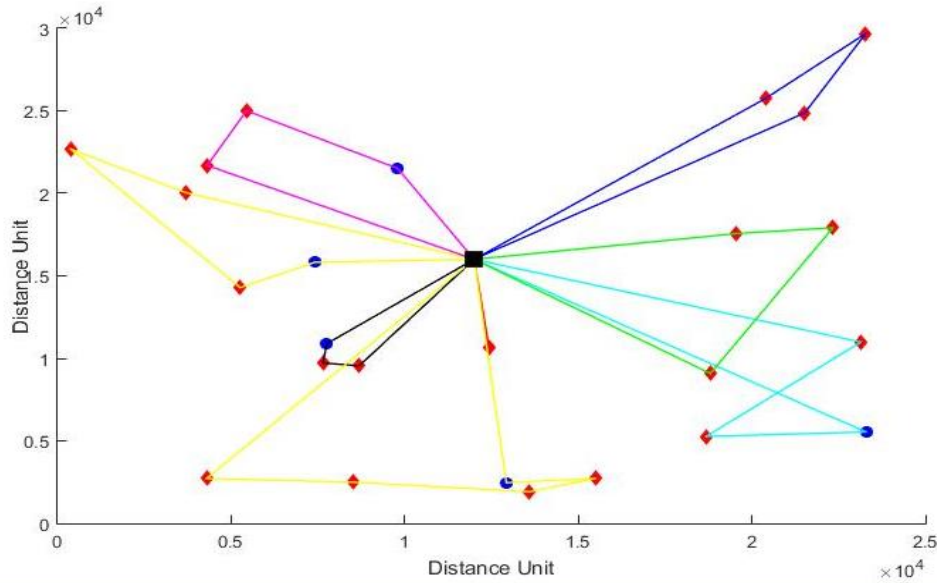
Çizelge 5.2’de yer alan tüm test problemleri için elde edilen değerler, ortalama %5.38 fark ile literatürde bilinen eniyi çözüm değerlerine yaklaşmıştır. İlk onbeş test probleminin on tanesinde literatürdeki eniyi yakalanmıştır. Tüm test problemleri için ortalama çözüm süresi **44.27** saniyedir. CPLEX çözücüsünün müşteri sayısının 15, araç sayısının ise 3 olduğu bir problem için yaklaşık dört saat sürede çözüm veremediği düşünüldüğünde bu sürenin oldukça makul bir süre olduğu söylenebilir. Küçük test problemlerinde literatürde bilinen eniyi değerlere ulaşılırken problemin boyutu arttıkça bilinen eniyi değerlere ulaşılmasa da makul sürelerde iyi çözümler elde edilmiştir. Test problemlerine ait program çıktıları Ek Açıklamalar-B’de verilmiştir.

Program aracılığıyla yapılan rotalama işleminin görsel olarak ifade edilebilmesi için A1 test probleminde yer alan depo ve müşterilerin koordinat düzleminde yerleşimi Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. A1 test problemi müşterilerinin koordinat düzleminde yeri

Dağıtım yapılacak müşteriler Şekil 5.9’da yer alan kırmızı köşeli noktalarla, toplama yapılacak müşteriler mavi yuvarlak noktalarla, depo ise siyah dörtgen nokta ile gösterilmiştir. Program aracılığı ile yapılan rotalama işlemi sonrası oluşan araç rotalarının koordinat düzleminde gösterimi Şekil 5.10’da yer almaktadır.



Şekil 5.10. A1 test problemine ait rotalar

Şekil 5.10’da araç rotaları farklı renklerde gösterilmiştir. Her araç rotası depoda başlar. Kırmızı renkte gösterilen dağıtım müşterilerinin ziyaret edilmesinin ardından mavi renkte gösterilen toplama müşterileri ziyaret edilir ve depoya dönülerek rota son bulur.

Test problemlerinin klasik ÖDST-ARP için çözülmesinden sonra aynı parametreler ile çevreci rotalama kapsamında FCC'yi enküçükleme amacı için çözülürmüştür. FCC'yi enküçükleme amacı için elde edilen rotalara karşı gelen toplam seyahat mesafesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'de yer almaktadır. Test problemlerine ait toplam FCC değerleri " Z_2 " sütunu altında sıralanırken, aynı rotalara karşı gelen toplam seyahat mesafesi değerleri " Z_1 " sütununda yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Yakıt tüketim maliyetini-FCC (Z_2) enküçükleyen model için test problemlerinin sonuçları

No.	İsim	N	L	B	Q	K	Z_2	Z_1	Süre (sn)
1	A1	25	20	5	1550	8	75,321	256,536	33,4
2	A2	25	20	5	2550	5	80,640	194,489	53,3
3	A3	25	20	5	4050	4	86,547	180,916	25,7
4	A4	25	20	5	4050	3	100,888	177,756	24,7
5	B1	30	20	10	1600	7	100,846	271,685	39,6
6	B2	30	20	10	2600	5	100,462	233,078	30,1
7	B3	30	20	10	4000	3	116,528	213,144	31,6
8	C1	40	20	20	1800	7	139,384	278,412	41,8
9	C2	40	20	20	2600	5	145,640	243,960	40,9
10	C3	40	20	20	4150	5	137,847	240,374	40,7
11	C4	40	20	20	4150	4	151,276	224,909	37,4
12	D1	38	30	8	1700	12	118,870	365,144	48,0
13	D2	38	30	8	1700	11	122,300	349,512	43,3
14	D3	38	30	8	2750	7	127,305	264,061	41,4
15	D4	38	30	8	4075	5	215,078	215,871	37,9
16	E1	45	30	15	2650	7	134,645	281,907	43,2
17	E2	45	30	15	4300	4	241,725	219,886	46,9
18	E3	45	30	15	5225	4	238,517	218,424	43,3
19	F1	60	30	30	3000	6	306,523	286,353	60,9
20	F2	60	30	30	3000	7	202,305	304,081	56,0
21	F3	60	30	30	4400	5	314,961	278,223	54,1
22	F4	60	30	30	5500	4	323,542	278,664	52,8
23	G1	57	45	12	2700	10	155,951	361,593	63,9
24	G2	57	45	12	4300	6	283,812	280,844	53,7
25	G3	57	45	12	5300	5	305,029	260,425	51,5
26	G4	57	45	12	5300	6	290,554	289,540	58,2
27	G5	57	45	12	6400	5	292,616	253,120	50,7
28	G6	57	45	12	8000	4	329,490	247,933	49,3
29	H1	68	45	23	4000	6	221,576	320,585	68,4
30	H2	68	45	23	5100	5	354,276	295,160	63,9
31	H3	68	45	23	6100	4	383,706	296,212	58,4
32	H4	68	45	23	6100	5	351,933	301,054	59,9
33	H5	68	45	23	7100	4	373,446	284,382	58,9

34	H6	68	45	23	7100	5	344,897	304,442	61,2
35	I1	90	45	45	3000	10	284,986	435,031	86,1
36	I2	90	45	45	4000	7	429,183	368,538	81,3
37	I3	90	45	45	5700	5	469,685	343,446	78,8
38	I4	90	45	45	5700	6	441,473	334,275	78,9
39	I5	90	45	45	5700	7	422,622	362,089	81,6
40	J1	94	75	19	4400	10	414,959	401,982	85,6
41	J2	94	75	19	5600	8	437,407	386,249	82,9
42	J3	94	75	19	8200	6	473,725	348,018	104,2
43	J4	94	75	19	6600	7	460,196	353,027	119,8
Toplam							11092,72	12405,33	2424.30
Ortalama							257,97	288,50	56.38

Erişilebilen literatürde, ÖDST-ARP için toplam FCC'nin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna ait çalışma bulunmamaktadır. Dolayısı ile bu aşamada literatürdeki sonuçlarla bir karşılaştırma yapılamamıştır. Toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi doğrudan müşteriler arası mesafeye bağlıyken, çevreci rotalama başlığı altında geliştirilen toplam FCC'nin enküçüklenmesine müşteriler arası mesafe ve müşteri talep değerleri etki eder. Bu sebeple amaçlardan herhangi biri için bulunan araç rotaları, diğer amaca hizmet etmeyebilir. Çizelge 5.4'de toplam FCC'nin enküçüklenmesi amacıyla çözülen test problemleri için elde edilen sonuçlar, toplam seyahat mesafesini enküçükleme amacıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

TB algoritması A1 test problemi toplam seyahat mesafesini enküçükleme amacı için çalıştırıldığında toplam mesafe değeri $Z_1 = 229,89$ km olarak bulunmuştur. Bulunan rotaya karşı gelen toplam FCC değeri $Z_2 = 104,69$ TL dir. Aynı şekilde kullanılan TB algoritması ile A1 test problemi toplam FCC değerini enküçüklemek amacıyla çözdürüldüğünde elde edilen toplam yakıt tüketimi maliyet değeri $Z_2 = 75,32$ TL olmuştur. Bulunan rotaya karşı gelen toplam seyahat mesafesi değeri $Z_1 = 256,54$ km dir (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4. Amaç fonksiyonlarının karşılaştırmalı sonuçları

No.	İsim	N	Klasik ÖDST-ARP (Enk Z ₁)			Çevreci ÖDST-ARP (Enk Z ₂)			Fark (%)		
			Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	Z ₁ (%artış)	Z ₂ (%azalış)	Z ₁ +Z ₂ (%artış)
1	A1	25	229,88	104,69	334,58	256,54	75,32	331,86	11,59	38,99	-0,81
2	A2	25	180,12	107,81	287,93	194,49	80,64	275,13	7,98	33,69	-4,45
3	A3	25	163,45	119,78	283,23	180,92	86,55	267,46	10,72	38,39	-5,89
4	A4	25	155,80	121,1	276,89	177,76	100,89	278,64	14,10	20,03	0,63
5	B1	30	239,08	117,54	356,62	271,69	100,85	372,53	13,64	16,55	4,46
6	B2	30	198,50	113,67	312,16	233,08	100,46	333,54	17,43	13,15	6,85
7	B3	30	169,37	127,64	297,02	213,14	116,53	329,67	25,84	9,53	10,99
8	C1	40	255,33	147,94	403,26	278,41	139,38	417,8	9,04	6,14	3,61
9	C2	40	215,02	147,96	362,98	243,96	145,64	389,6	13,46	1,59	7,33
10	C3	40	200,59	162,51	363,1	240,37	137,85	378,22	19,83	17,89	4,16
11	C4	40	197,51	158,63	356,14	224,91	151,28	376,19	13,87	4,86	5,63
12	D1	38	322,53	146,38	468,91	365,14	118,87	484,01	13,21	23,14	3,22
13	D2	38	316,71	150,81	467,52	349,51	122,3	471,81	10,36	23,31	0,92
14	D3	38	239,48	135,04	374,52	264,06	127,31	391,37	10,26	6,07	4,50
15	D4	38	211,31	234,62	445,93	215,87	215,08	430,95	2,16	9,08	-3,36
16	E1	45	243,49	150,26	393,75	281,91	134,65	416,55	15,78	11,59	5,79
17	E2	45	218,22	256,99	475,21	219,89	241,73	461,61	0,76	6,31	-2,86
18	E3	45	213,13	240,05	453,19	218,42	238,52	456,94	2,48	0,64	0,83
19	F1	60	277,10	307,61	584,71	286,35	306,52	592,88	3,34	0,36	1,40
20	F2	60	276,78	297,05	573,83	304,08	202,31	506,39	9,86	46,83	-11,75

21	F3	60	259,72	319,79	579,51	278,22	314,96	593,18	7,12	1,53	2,36
22	F4	60	251,56	327,36	578,92	278,66	323,54	602,21	10,77	1,18	4,02
23	G1	57	316,96	205,29	522,24	361,59	155,95	517,54	14,08	31,64	-0,90
24	G2	57	247,04	292,9	539,94	280,84	283,81	564,66	13,68	3,20	4,58
25	G3	57	234,05	320,21	554,26	260,43	305,03	565,45	11,27	4,98	2,02
26	G4	57	248,81	336,08	584,89	289,54	290,55	580,09	16,37	15,67	-0,82
27	G5	57	239,47	356,67	596,14	253,12	292,62	545,74	5,70	21,89	-8,45
28	G6	57	230,36	338,7	569,06	247,93	329,49	577,42	7,63	2,80	1,47
29	H1	68	282,84	334,48	617,32	320,59	221,58	542,16	13,35	50,95	-12,18
30	H2	68	273,45	354,28	627,73	295,16	354,28	649,44	7,94	0,00	3,46
31	H3	68	278,76	401,12	679,88	296,21	383,71	679,92	6,26	4,54	0,01
32	H4	68	266,12	361,35	627,47	301,05	351,93	652,99	13,12	2,68	4,07
33	H5	68	273,20	395,88	669,09	284,38	373,45	657,83	4,09	6,01	-1,68
34	H6	68	271,85	361,02	632,87	304,44	344,9	649,34	11,99	4,67	2,60
35	I1	90	373,76	291,98	665,73	435,03	284,99	720,02	16,39	2,45	8,15
36	I2	90	343,07	431,25	774,32	368,54	429,18	797,72	7,42	0,48	3,02
37	I3	90	337,72	493,76	831,48	343,45	469,69	813,13	1,70	5,12	-2,21
38	I4	90	334,27	441,47	775,75	334,28	441,47	775,75	0,00	0,00	0,00
39	I5	90	345,27	460,99	806,26	362,09	422,62	784,71	4,87	9,08	-2,67
40	J1	94	362,33	436,43	798,76	401,98	414,96	816,94	10,94	5,17	2,28
41	J2	94	337,81	463,92	801,74	386,25	437,41	823,66	14,34	6,06	2,73
42	J3	94	331,90	504,76	836,66	348,02	463,72	741,74	4,86	8,85	-11,35
43	J4	94	340,90	519,47	860,35	353,03	460,2	813,23	3,57	12,88	-5,48
Toplam			11304,52	12097,24	23401,85	12405,33	11092,72	23428,02	433,17	530,01	26,23
Ortalama			262,89	281,33	544,22	288,50	257,97	544,84	10,07	12,33	0,61

Toplam seyahat mesafesi amaç fonksiyonu değeri "km", toplam FCC amaç fonksiyonu değeri ise "TL" cinsinden elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu değerleriyle işlem yapabilmek ve toplam maliyet değerini hesaplayabilmek için toplam seyahat mesafesinin enküçüklendiği amaç fonksiyonu km başına maliyet değeri (M_0) ile çarpılmıştır. Sözkonusu değer tüm test problemlerinde “bir ($M_0 = 1$)” olarak alınmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Yapılan bu işlemden sonra toplam seyahat mesafesi değerleri, toplam seyahat mesafesine bağlı maliyet değerleri olarak güncellenmiştir. Böylelikle hem toplam mesafeyi enküçükleme amacı için elde edilen değerler rakamsal olarak değişmemiş hem de amaç fonksiyonları aynı birim üzerinden değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.4’ün son satırında ortalama değerler yer almaktadır. ÖDST-ARP test problemleri çözülürken amaç fonksiyonu olarak çevreci rotalama başlığı altında sunulan toplam FCC’nin enküçüklenmesi seçildiğinde, mesafeye bağlı maliyet amacıyla elde edilen FCC’de ortalama %12.33’lük bir azalış sağlanmıştır. Bu azalış toplam seyahat mesafesine bağlı maliyette ortalama %10.07’lik bir artışa sebep olmuştur. Toplam maliyet miktarında gerçekleşecek ortalama %0.61’lik bir artış ile toplam FCC ve ona bağlı olarak toplam CO₂ salınım miktarında önemli kazanımlar elde etmek mümkündür.

Çözüm değerleri incelendiğinde toplam seyahat mesafesine bağlı maliyet amacıyla meydana gelecek bir artışın, toplam FCC değerinde azalışa, aynı şekilde toplam FCC değerinde meydana gelecek artışın da toplam seyahat mesafesine bağlı maliyette azalışa sebep olma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu durum çok amaçlı problemlerde amaçların birbiriyle çelişmesi şeklinde yorumlanmaktadır. Buradan hareketle test problemlerinin büyük çoğunluğunda ele alınan iki amacın birbiriyle çeliştiği yorumu yapılabilir. Ancak bazı özel durumlarda amaçların çelişmediği sonuçlar da mümkündür. Test problemi I4 toplam seyahat mesafesine bağlı maliyeti enküçüklemek ve toplam FCC’yi enküçüklemek amaçları için çözdürüldüğünde elde edilen rota ve karşı gelen amaç fonksiyonu değerleri aynı olmuştur. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; problemin toplam seyahat mesafesine bağlı maliyeti enküçüklemek amacı için çözdürülmesiyle elde edilen rotada, dağıtım müşterilerinin talepleri büyükten küçüğe, toplama müşterilerinin talepleri ise küçükten büyüğe sıralanmıştır. Bu nedenle toplam FCC’yi enküçüklemek amacı için de aynı rota bulunmuştur.

Test problemlerinin çözümüyle elde edilen değerlerin amaçlar arasında yapılacak ödünleşmelere uygun olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple problemlerin çözümünde her iki amacın birlikte ele alınması durumu değerlendirilmiş ve böylelikle daha düşük toplam maliyette rotaların elde edilmesi amaçlanmıştır.

5.4.2. Amaçlara ilişkin ödünleşmeler

Toplam seyahat mesafesine bağlı maliyetin ve toplam yakıt tüketimi maliyetinin enküçüklenmesi amaçlarının birleştirilmesinde ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılmış ve amaçlara ilişkin ödünleşmeler incelenmiştir. Skalerleştirme; çok amaçlı bir eniyileme probleminin, gerçek değerli bir amaç fonksiyonuna sahip uygun bir skaler eniyileme problemi ile değiştirilmesidir. Çok amaçlı bir eniyileme problemi bazı parametre veya ek kısıtlar içeren skalerleştirme fonksiyonları aracılığı ile tek amaçlı bir eniyileme problemi haline gelir. Literatürde çok sayıda skalerleştirme yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi, Epsilon kısıt yöntemi, Chbyshev yöntemi, Benson yöntemi, Pascoletti-Serafini yöntemi ve Konik skalerleştirme yöntemidir. Bu çalışmada Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi kullanılmıştır. Skalerleştirme yöntemlerine ait genel kavramlar ve tanımlar aşağıda verildiği gibidir:

Negatif olmayan reel sayılar kümesi şu şekilde tanımlanmıştır; $\mathbb{R}_+^n = \{y = (y_1, \dots, y_n) : y_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$ ve $\mathbb{Y} \subset \mathbb{R}^n$ boş olmayan bir kümedir. $\mathbb{R}^n$ 'de boş olmayan $\mathbb{C}$ alt kümesi, eğer $y \in \mathbb{C} \lambda \geq 0 \Rightarrow \lambda y \in \mathbb{C}$ ise *koni* olarak adlandırılır.

$\mathbb{R}^n$ kümesi, $\mathbb{C} \subset \mathbb{R}^n$ şeklinde bir koni tarafından kısmi sıralanmış kabul edilir.

Tanım 1 (Ehrgott, 2005) :

- $y \in \mathbb{Y}$ noktası eğer $(\{y\} - \mathbb{C}) \cap \mathbb{Y} = \{y\}$ ise $\mathbb{Y}$ 'nin ($\mathbb{C}$ sıralama konisine göre) minimal noktasıdır.
- $y \in \mathbb{Y}$ noktası eğer $(\{y\} - \text{int}(\mathbb{C})) \cap \mathbb{Y} = \emptyset$ ise zayıf minimal nokta olarak adlandırılır.

- Bir $\mathbf{y} \in \mathbb{Y}$ noktası eğer $\mathbf{y}$ noktası $\mathbb{Y}$ 'nin minimal noktası ve $\mathbb{R}^n$ 'nin sıfır noktası $\text{cone}(\mathbb{Y}) := \{\lambda \mathbf{y} : \lambda \geq 0, \mathbf{y} \in \mathbb{Y}\}$ iken $\text{cl}(\text{cone}(\mathbb{Y} + \mathbb{C} - \{\mathbf{y}\}))$ 'nin minimal noktası ise $\mathbb{Y}$ kümesinin Benson anlamda has minimal noktasıdır.

$\bar{\mathbf{Y}} \in \mathbb{Y}$ noktası eğer $\mathbb{C} \setminus \{\mathbf{0}\} \subset \text{int}\mathbb{K}$ iken bir $\mathbb{K}$ konisine göre $\mathbb{Y}$ kümesinin minimal noktası ise Henig anlamda has minimal nokta olarak adlandırılır.

Çok amaçlı eniyileme problemi aşağıda verilmiştir;

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{X}} [f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})], \quad (5.1)$$

$\mathbb{X}$ uygun çözümlerin boş olmayan bir kümesi ve $f_i : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, n$ gerçekteğerli fonksiyonlar olsun. Her $\mathbf{x} \in \mathbb{X}$ için $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x}))$ ve $\mathbb{Y} := \mathbf{f}(\mathbb{X})$ olsun.

Tanım 2 (Ehrgott, 2005) :

Eğer $\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ noktası $\mathbb{Y}$ kümesinin minimal, zayıf ya da has minimal noktası ise bir $\mathbf{x} \in \mathbb{X}$ uygun çözümü (5.1) probleminin etkin, zayıf ya da has etkin çözümüdür.

$\mathbb{C}$ konisi $\mathbb{R}^n$ 'de verilsin. $\mathbb{C}$ konisinin dual konisi $\mathbb{C}^*$ ve quasi-iç konisi $\mathbb{C}^\#$ şu şekilde tanımlanır;

$$\mathbb{C}^* = \{ \mathbf{y}^* \in \mathbb{R}^n : \mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} \geq 0 \text{ for all } \mathbf{y} \in \mathbb{C} \}, \quad (5.2)$$

ve

$$\mathbb{C}^\# = \{ \mathbf{y}^* \in \mathbb{R}^n : \mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} \geq 0 \text{ for all } \mathbf{y} \in \mathbb{C} \setminus \{\mathbf{0}\} \}, \quad (5.3)$$

$\mathbf{y}^{*T}$ vektörü, $\mathbf{y}^*$ vektörünün transpozu, $\mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} = \sum_{i=1}^n y_i^* y_i$ ise $\mathbf{y}^* = (y_1^*, \dots, y_n^*)$ ve $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ vektörlerinin skaler çarpımıdır.

İzleyen üç koni genişletilmiş dual koniler olarak adlandırılır ve Gasimov'un 2001 yılındaki çalışmasında tanıtılmıştır.

$$\mathbb{C}^{a*} = \{ (\mathbf{y}^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : \mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} - \alpha \|\mathbf{y}\| \geq 0 \text{ for all } \mathbf{y} \in \mathbb{C} \}, \quad (5.4)$$

$$\mathbb{C}^{a0} = \{ (\mathbf{y}^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : \mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} - \alpha \|\mathbf{y}\| \geq 0 \text{ for all } \mathbf{y} \in \text{int}(\mathbb{C}) \}, \quad (5.5)$$

ve

$$\mathbb{C}^{a\#} = \{ (\mathbf{y}^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : \mathbf{y}^{*T} \mathbf{y} - \alpha \|\mathbf{y}\| \geq 0 \text{ for all } \mathbf{y} \in \mathbb{C} \setminus \{\mathbf{0}\} \}, \quad (5.6)$$

$\mathbb{C}^{a0}$ konisinin tanımında $\mathbb{C}$ konisinin boş olmadığı varsayılmıştır. $\mathbb{C}^{a*}$, $\mathbb{C}^{a0}$ ve $\mathbb{C}^{a\#}$ konileri arasındaki izleyen ilişki tanımlarından çıkarılmaktadır;

$$\mathbb{C}^{a*} \subset \mathbb{C}^{a0} \subset \mathbb{C}^{a\#}.$$

Ağırlıklandırılmış toplam skalerleştirme yöntemi 1955 yılında Gass ve Saaty tarafından literatüre kazandırılmıştır ve çok amaçlı eniyileme problemlerinin çözümünde kullanılan en yaygın skalerleştirme yöntemlerinden biridir. Ağırlıklandırılmış toplam yönteminde, karar verici tarafından her bir amaç için bir ağırlık katsayısı belirlenir ve amaçlar bu ağırlık katsayısı ile ilişkilendirilir. Amaçların ağırlıklandırılmış toplamı ile oluşturulan fonksiyon eniyilenmeye çalışılır.

Genellikle $w' = (w_1, \dots, w_n)$ vektörü $\mathbb{C}^*$ dual konisinden seçilmektedir ve $\mathbb{C}^*$ sıralama konisini temsil eder. Skalerleştirmede kullanılacak her w_i ($w_i \geq 0$) ağırlığı bir $f_i(x)$, ($i = 1, \dots, n$) amaç fonksiyonu ile ilişkilendirildiğinde verilen (w') vektörü için skaler problem şu şekilde olacaktır:

$$\min_{(x \in \mathbb{X})} \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (WSS(w)) \quad (5.7)$$

Eğer uygun çözüm alanının amaç uzayındaki görüntü kümesi dışbükey değilse, verilen bir $\mathbb{Y}$ kümesinin dışbükey olmayan kısımlarına, amaç fonksiyonlarının dışbükey bileşenlerini eniyileyerek ulaşılamaz. Ancak amaç uzayı dışbükey ise bu yöntemle zayıf ve has etkin çözümlerin tamamına ulaşabilmek mümkündür.

Ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminde beş farklı ağırlık katsayısı kullanılmıştır. Kullanılan ağırlık katsayıları şu şekilde tanımlanmıştır:

$$(w_1, w_2) = (0.9, 0.1),$$

$$(w_1, w_2) = (0.6, 0.4),$$

$$(w_1, w_2) = (0.5, 0.5),$$

$$(w_1, w_2) = (0.4, 0.6),$$

$$(w_1, w_2) = (0.1, 0.9).$$

Modelde birinci amacın yani toplam seyahat mesafesine bağı maliyetinin ağırlık katsayıları " w_1 " ile ikinci amaç olan toplam FCC'nin ağırlık katsayıları ise " w_2 " ile gösterilmiştir. Toplam seyahat mesafesine bağı amaç fonksiyonu değeri " Z_1 ", toplam FCC " Z_2 " ve problemin skalerleştirme yöntemi ile çözülmesiyle elde edilen toplam maliyet değeri " Z " sütununda verilmiştir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5. Ağırlıklı toplam skalerleştirme ile elde edilen sonuçlar

Problem Adı	Toplam Düğüm Sayısı	Klasik ÖDST-ARP Enk Z ₁			Çevreci ÖDST-ARP Enk Z ₂			Enk Z = (w ₁ Z ₁ + w ₂ Z ₂)														
		Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	(w ₁ ,w ₂) = (0.9 ,0.1)			(w ₁ ,w ₂) = (0.6 ,0.4)			(w ₁ ,w ₂) = (0.5 ,0.5)			(w ₁ ,w ₂) = (0.4 ,0.6)			(w ₁ ,w ₂) = (0.1 ,0.9)		
		Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	Z ₁	Z ₂	Z ₁ +Z ₂	Z ₁	Z ₂	Z	Z ₁	Z ₂	Z	Z ₁	Z ₂	Z	Z ₁	Z ₂	Z	Z ₁	Z ₂	Z
A1	25	229,88	104,69	334,58	256,54	75,32	331,86	230,55	92,55	323,10	234,36	83,35	317,71	235,83	81,35	317,18	236,76	81,10	317,86	251,44	75,96	327,40
A2	25	180,12	107,81	287,93	194,49	80,64	275,13	180,68	100,59	281,27	181,86	92,96	274,82	185,59	88,76	274,35	194,30	82,69	276,99	194,49	80,64	275,13
A3	25	162,08	119,78	281,86	180,92	86,55	267,46	164,53	118,97	283,50	170,51	94,16	264,66	173,96	87,18	261,13	188,28	88,25	276,54	175,88	86,74	262,62
A4	25	155,80	121,10	276,89	177,76	100,89	278,64	155,80	121,10	276,89	160,29	105,59	265,87	160,34	105,47	265,81	162,16	105,03	267,19	167,37	102,68	270,05
B1	30	239,10	117,50	356,62	271,69	100,85	372,53	242,03	116,20	358,23	243,58	106,05	349,63	243,59	105,71	349,30	249,78	105,06	354,84	255,32	101,00	356,32
B2	30	198,50	113,70	312,16	233,08	100,46	333,54	198,28	113,12	311,40	199,31	113,89	313,20	198,81	113,12	311,93	210,63	103,85	314,49	213,51	102,23	315,74
B3	30	169,40	127,60	297,02	213,14	116,53	329,67	169,37	127,64	297,02	171,31	125,47	296,78	174,79	120,96	295,75	174,79	120,96	295,75	208,75	116,70	325,45
C1	40	255,33	147,94	403,26	278,41	139,38	417,80	255,84	143,32	399,16	255,82	140,68	396,50	259,05	142,12	401,17	259,52	142,10	401,62	278,89	139,64	418,53
C2	40	215,02	147,96	362,98	243,96	145,64	389,60	224,99	146,99	371,97	225,25	147,32	372,57	226,83	145,64	372,47	228,51	148,78	377,30	232,44	147,86	380,30
C3	40	200,59	162,51	363,10	240,37	137,85	378,22	204,87	151,96	356,83	220,66	147,19	367,85	215,54	147,86	363,40	224,97	147,70	372,67	227,26	142,49	369,75
C4	40	197,51	158,63	356,14	224,91	151,28	376,19	205,44	158,11	363,54	209,08	157,55	366,62	211,30	150,22	361,52	201,87	159,60	361,47	219,32	154,72	374,04
E1	45	243,49	150,26	393,75	281,91	134,65	416,55	244,66	140,41	385,07	245,78	140,95	386,73	253,96	139,50	393,46	250,62	139,50	390,12	281,97	134,24	416,21
E2	45	218,22	256,99	475,21	219,89	241,73	461,61	218,77	253,26	472,03	219,02	250,21	469,23	219,27	248,32	467,59	219,42	244,26	463,68	224,85	243,45	468,30
E3	45	213,13	240,05	453,19	218,42	238,52	456,94	219,27	245,73	465,00	218,96	249,44	468,40	217,17	238,40	455,57	218,06	249,44	467,50	218,42	238,52	456,94

Çizelge 5.5’de yer alan sonuçlar incelendiğinde problem çözümünde amaçların birlikte ele alınmasıyla daha düşük toplam maliyet değerine sahip rotaların elde edilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Örneğin; A1 test problemi toplam seyahat mesafesine bağlı maliyeti enküçüklemek amacı için çözdürüldüğünde elde edilen toplam maliyet değeri 334,58 TL’dir. A1 test problemi toplam FCC’yi enküçüklemek amacı için çözdürüldüğünde elde edilen toplam maliyet değeri ise 331,86 TL olarak hesaplanmıştır. A1 test problemi çözümünde ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılmasıyla farklı ağırlık katsayılarının hepsi için 331,86 TL’den daha düşük toplam maliyet değerine ulaşıldığı görülmüştür. Amaçlara atanan ağırlıklar ve elde edilen toplam maliyet değerleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
 (w_1, w_2) &= (0.9, 0.1), & Z &= 323,10 \text{ TL} \\
 (w_1, w_2) &= (0.6, 0.4), & Z &= 317,71 \text{ TL} \\
 (w_1, w_2) &= (0.5, 0.5), & Z &= 317,18 \text{ TL} \\
 (w_1, w_2) &= (0.4, 0.6), & Z &= 317,86 \text{ TL} \\
 (w_1, w_2) &= (0.1, 0.9), & Z &= 327,39 \text{ TL'dir.}
 \end{aligned}$$

Ağırlıklı toplam skalerleştirme uygulanarak çözülen test problemleri değerlendirildiğinde ağırlıkların $(w_1, w_2) = (0.5, 0.5)$ olarak seçilmesiyle daha düşük toplam maliyetler elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple test problemlerinin çözümünde ağırlık katsayıları $(w_1, w_2) = (0.5, 0.5)$ olarak seçilmiştir (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6.Ödünleşmelere ilişkin sonuçlar

Problem Adı	Toplam Düğüm Sayısı	Klasik ÖDST-ARP Enk Z_1	Çevreci ÖDST-ARP Enk Z_2	Enk $Z = w_1Z_1 + w_2Z_2$
		$Z_1 + Z_2$	$Z_1 + Z_2$	$Z = 0.5Z_1 + 0.5Z_2$
A1	25	334,58	331,86	317,18
A2	25	287,93	275,13	274,35
A3	25	283,23	267,46	261,13
A4	25	276,89	278,64	265,81
B1	30	356,62	372,53	349,30
B2	30	312,16	333,54	311,93
B3	30	297,02	329,67	295,75
C1	40	403,26	417,80	401,17
C2	40	362,98	389,60	372,47
C3	40	363,10	378,22	363,40
C4	40	356,14	376,19	361,52
E1	45	393,75	416,55	393,46
E2	45	475,21	461,61	467,59
E3	45	453,19	456,94	470,87
Toplam		4956,06	5085,74	4905,92
Ortalama		354,00	363,27	350,42

Test problemlerinin çözümünde ağırlıklı toplam skalerleştirme kullanılmasıyla elde edilen toplam maliyet değerlerinin, toplam seyahat mesafesine bağlı maliyetin enküçüklendiği klasik ÖDST-ARP'nin çözümüyle bulunan toplam maliyet değerlerine göre **%1.0**, toplam FCC'nin enküçüklendiği çevreci ÖDST-ARP'nin çözümünden elde edilen maliyet değerlerine göre ise **%4.0** daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Tez çalışmasına ayrılan sürenin kısıtlı olması sebebiyle tüm test problemleri için skalerleştirme yapılarak çözüm bulunamamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde artarak devam etmekte olan çevresel kaygılar nedeniyle işletme yöneticilerinin lojistik faaliyetlerini planlarken yalnızca kârlılık amacını dikkate alması yeterli olmamaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde lojistik faaliyetlerinin çevreci bir bakış açısıyla planlandığı görülmektedir. Bu çalışmada ÖDST-ARP, çevreci bir yaklaşımla değerlendirilmiş ve toplam yakıt tüketimi maliyetinin (FCC) hesaplandığı amaç fonksiyonu incelenmiştir. Ele alınan problemde yola ve yüke bağlı toplam FCC'nin enküçüklenmesi amaçlanmış ve problemin çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel modelin çözümünde problemin boyutu arttıkça kesin çözüm veren yöntemlerin yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sebeple eniyi sonucu garanti etmeyen ancak makul sürelerde sonuç veren tavlama benzetimi metasezgiseli önerilmiştir.

Çevreci ÖDST-ARP çözümü için önerilen tavlama benzetimi algoritmasının etkinliği literatürden alınan test problemleri üzerinde incelenmiştir. Test problemleri çözülürken ilk olarak toplam seyahat mesafesinin enküçüklenmesi amaçlanmış, bu amaçla elde edilen rotalara karşı gelen toplam FCC değerleri hesaplanmıştır. Ardından test problemleri aynı koşullar altında toplam FCC'yi enküçüklemek amacıyla çözdürülmüş ve elde edilen rotalara karşı gelen toplam seyahat mesafesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Amaç fonksiyonlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için toplam seyahat mesafesi amaç fonksiyonu toplam seyahat mesafesine bağlı maliyeti hesaplayacak şekilde güncellenmiştir. ÖDST-ARP'ye ait test problemlerinin çözümünde toplam FCC'nin enküçüklenmesi amaçlandığında, toplam seyahat mesafesine bağlı maliyetin enküçüklenmesi amacıyla elde edilen toplam FCC değeri ortalama %12.33 azalmıştır. Bu azalış toplam seyahat mesafesinde ortalama %10.07'lik bir artışa sebep olmuştur. Toplam maliyet değerlendirildiğinde ise %0.61'lik bir artış sözkonusudur. Buradan hareketle toplam maliyet miktarında gerçekleşecek düşük oranda bir artış ile toplam FCC ve ona bağlı olarak toplam CO₂ salınım miktarında önemli kazanımlar elde etmenin mümkün olduğu söylenebilir.

Test problemlerinin toplam seyahat mesafesine bağlı maliyeti enküçüklemek ve toplam FCC'yi enküçüklemek amaçları için çözdürülmesinden elde edilen değerlerde

amaçlardan birinde gerçekleşecek artışın diğer amaç değerinde azalışa, amaçlardan birinde gerçekleşecek azalışın ise diğer amaçta artışa sebep olma eğiliminde olduğu göze çarpmıştır. Bu nedenle amaçlar arasındaki ödünleşmelerin incelenmesi ve daha düşük toplam maliyet değerine sahip rotaların araştırılması amacıyla amaç fonksiyonları birleştirilmiştir. Amaç fonksiyonlarının birleştirilmesinde ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen test problemi setinden seçilen bazı problemlerin çözümünde skalerleştirme uygulanmıştır. Skalerleştirme yöntemiyle çözüm elde ederken beş farklı ağırlık katsayısı kullanılmıştır. Elde edilen çözüm değerleri incelendiğinde daha düşük toplam maliyet değerinde sonuçlar vermesi nedeniyle ağırlık katsayılarının $(w_1, w_2) = (0.5, 0.5)$ olarak seçilmesinin daha uygun olduğu görülmüştür. Test problemleri sözkonusu katsayılar ile skalerleştirilip çözüldüğünde elde edilen toplam maliyet değerleri, toplam seyahat mesafesine bağlı maliyetin enküçüklendiği klasik ÖDST-ARP'nin çözümünden elde edilen toplam maliyet değerlerine göre %1.0 daha düşük olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu değerlerin toplam FCC'nin enküçüklendiği çevreci ÖDST-ARP'nin çözümünden elde edilen maliyet değerlerine göre ise %4.0 daha düşük olduğu görülmektedir.

Erişilebilen literatürde incelenen çevresel çalışmalarda genellikle mesafe ve salınım faktörlerini içeren kapsamlı amaç fonksiyonları ile çalışıldığı görülmektedir. Çevreci rotalama başlığı altında önerilen Çevreci-ÖDST-ARP hem çevresel faktörleri değerlendirmesi hem de toplam seyahat mesafesine bağlı maliyet ve toplam yakıt tüketimi amaçları arasındaki ödünleşmeleri ele alması açısından önemlidir.

Çalışmanın devamında, gidilen yol ve araç yükünün yanında yol eğimi ve araç hızı da dikkate alınarak ÖDST-ARP ele alınabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Apak, G., Ubay, B., 2007, Türkiye İklim Değişikliği Birinci Ulusal Bildirimi, Çevre ve Orman Bakanlığı Raporu, Ankara, 274s.
- Brandão, J., 2006, A new tabu search algorithm for the vehicle routing problem with backhauls, *European Journal of Operational Research*, 173, p.540-555.
- Bektaş, T., Laporte, G., 2011, The pollution-routing problem, *Transportation Research Part B* 45, p.1232-1250.
- Cuervo, D.P., Goos P., Sorensen K., Arráiz E., 2014, An iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with Backhauls, *European Journal of Operational Research*, 237, p.454-464.
- Dantzig, G. B., Ramser, J. H., 1959, The truck dispatching problem, *Management Science*, 6(1), p.80-91.
- Deif, L. Bodin, 1984, Extension of the Clarke and Wright Algorithm for Solving the Vehicle Routing Problem with Backhauling, *Proceedings of the Babson Conference on Software Uses in Transportation and Logistics Management*, A. E. Kidder, Editor, Babson Park, MA, p.75-96.
- Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G., 2011, A comparative analysis of several vehicle emission models for road transportation, *Transportation Research Part D*, 16, p.347-357.
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., 2012, An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), p.346-359.
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., 2014, A review of recent research on green road freight transportation, *European Journal of Operational Research*, 237, p.775-793.
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., 2014, The bi-objective pollution-routing problem, *European Journal of Operational Research*, 232(3), p.464-478.
- Ehrgott, M., 2005, *A Multicriteria Optimization*, Multicriteria Optimization, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Erdoğan, S., Miller-Hooks, E., 2012, A Green Vehicle Routing Problem, *Transportation Research Part E*, 48, p.100-114.
- Erol, V., 2006, Araç Rotalama Problemleri İçin Popülasyon ve Komşuluk Tabanlı Metasezgisel Bir Algoritmanın Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 161s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fizgliozi, M.A., 2010, An iterative route construction and improvement algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows, *Transportation Research Part C*, 18, p.668-679.
- Gajpal, Y. ve Abad, P. L., 2009, Multi-ant colony system (MACS) for a vehicle routing problem with backhauls, *European Journal of Operational Research*, 196, p.102-117.
- Gasimov R. N., 2001, Characterization of the Benson proper efficiency and scalarization in nonconvex vector optimization, In: M. Koksalan, S. Zionts (eds.) *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium*, Book Series: *Lecture Notes in Econom. and Math. Systems*, 507, p.189-198.
- Gass S. ve Saaty T., 1955, The computational algorithm for the parametric objective function, *Naval Res. Logistics Quart.* 2, p.39.
- Goetschalckx M., Jacobs-Blecha C., 1989, The Vehicle Routing Problem with Backhauls, *European Journal of Operational Research*, 42, p.39-51.
- Gribkovskaia, I., Halskau, Q., Laporte, G., 2007, The bridges of Königsberg-A historical perspective, *Networks*, 49, p.1707-1783.
- Gross, J.L. and Yellen, J., 2004, *Handbook of graph theory*, CRC Press, Boca Raton, 1115p.
- Güner E.ve Altıparmak F., 2003, İki Ölçütlü Tek Makinalı Çizelgeleme Problemi İçin Sezgisel Bir Yaklaşım, *Gazi Üniversitesi Mühendislik. Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18, s.27-42.
- Kara, I., Kara, B.,Y. and Yetiş, M.K., 2007, Energy minimizing vehicle routing problem, *Combinatorial Optimization and Applications*, *Proceedings 1st International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, Xian, PEOPLES R CHINA.
- Kara, I., Kara, B.,Y. and Yetiş, M.K., 2008, Vehicle routing problem, *Croatia*, p 125.
- Karaoğlu, İ., 2009, Dağıtım Ağları Tasarımında Yer Seçimi ve Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 130s.
- Karaoglan, I., Altıparmak, F., 2015, A memetic algorithm for the capacitated location routing problem with mixed backhauls, *Computers & Operations Research*, 55, p.200-216.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Keçeci, B., 2008, Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama için Tamsayı Karar Modelleri, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 76s.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D, Veechi, M.P., 1983, Optimization by simulated annealing, Science, 220, 4598, p.671-680.
- Koc C., Bektaş T., Jabali O., Laporte G., 2014, The fleet size and mix pollution-routing problem, Transportation Research Part B, 70, p.239-254.
- Koshy T., 2004, Discrete Mathematics with Applications, Academic Press, p.515-618.
- Kramer R., Subramaniana A., Vidal T., Cabral A:F., 2015, A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem, European Journal of Operational Research, 243, p.523-539
- Kucukoglu, I., Ozturk N., 2015, An advanced hybrid meta-heuristic algorithm for the vehicle routing problem with backhauls and time windows, Computers & Industrial Engineering, 86, p.60–68.
- Kumar, R.S., Kondapaneni, K., Dixit, V., Goswami, A., Thakur, L.S., Tiwari, M.K., 2015, Multiobjective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization approach, Computers & Industrial Engineering.
- Kuo, Y., 2010, Using simulated annealing to minimize fuel consumption for time dependent vehicle routing problem, Computers & Industrial Engineering, 59, p.157-165.
- Kwon, Y.-J., Choi, Y.-J., & Lee, D.-H. , 2013, Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 23, p.81–89.
- Laporte, G., Nobert ,Y:, 1987, Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem, North Holland Mathematics Studies, p.147-184.
- Li, J., 2012, Vehicle routing problem with time windows for reducing fuel consumption, Journal of Computers, 7(12), p.3020–3027.
- Martínez, F.J.Z., 2003, Postman problems on mixed graphs, PhD thesis, University of Waterloo, 176 p.
- Mingozi, A., Giorgi, S., Baldacci, R., 1999, An Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Backhauls, Transportation Science, 33 (3), p.315–329.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nájera, A., Bullinaria J.A., Gutiérrez-Andrade M.A., 2015, An evolutionary approach for multi-objective vehicle routing problems with backhauls, *Computers & Industrial Engineering*, 81, p. 90–108.
- Özsoydan, F. B., 2011, Birikimli Açık Araç Rotalama Problemi İçin Sezgisel Çözüm Yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, OGU, Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s.
- Pradenas, L., Boris Oportus B., a,1, Parada V., 2013, Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling, *Expert Systems with Applications*, 40, p.2985–2991.
- Reimann, M., Doerner, K. ve Hartl, R.F., 2004, Dants: Savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem, *Computers and Operations Research*, 31, p.563-591.
- Ropke, S., Pisinger, D., 2006, “A Unified Heuristic for A Large Class of Vehicle Routing Problems with Backhauls”, *European Journal of Operational Research*, 171, p.750–775.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Saremi, A. R., ve Ziaee, M. S., 2006, A memetic algorithm for a vehicle routing problem with backhauls, *Applied Mathematics and Computations*, 181, p.104-1060.
- Toth, P., Vigo, D., 1996, A Heuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Backhauls, *Advanced Methods in Transportation Analysis*, Springer Verlag Berlin, p.585-608.
- Toth, P., Vigo, D., 1997, An exact algortihm for the vehicle routing problem with backhauls, *Transportation Science*, 31(4), p.372-385.
- Toth, P., ve Vigo, D., 1999, A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls, *European Journal of Operational Research*, 113, p.528-543.
- Toth, P. ve Vigo, D., 2002, *The Vehicle Routing Problem*, Bologna, Siam.
- Tütüncü, G. Y., Carreto, C. A., ve Baker, B. M., 2009, A visual interactive approach to classical and mixed vehicle routing problems with backhauls, *The International Journal of Management Science*, 37, p.138-154.
- Tütüncü, G. Y., 2010, An interctive GRAMPS algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem with and without backhauls, *European Journal of Operational Research*, 201, p.593-600.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Türkeş, M., 2001, ‘Küresel iklimin korunması’, Cumhuriyet Bilim Teknik Dergisi, s.721.
- Ubeda, S., Arcelus F.J., Faulin J., 2011, Green logistics at Eroski: A case study, Int. J. Production Economics, 131, p.44-51.
- Wade, A., ve Salhi, S., 2002, An investigation into a new class of vehicle routing problem with backhauls, The International Journal of Management Science, 30, p.479-487.
- Wang, Z., ve Wang, Z., 2009, A novel two-phase heuristic method for vehicle routing problem with backhauls, Computer and Mathematics with Applications, 57, p.1923-1928.
- Wang, H.F., Chen Y.Y., 2013, A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows, Int. J. Production Economics, 144, p.4-13.
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., Xu, Y., 2012,. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. Computers & Operations Research, 39(7), p.1419–1431.
- Yano, C.A., Chan, T. J., Richter, L., Culter, T., Murty, K. G., McGettigan, D., 1987, Vehicle Routing at Quality Stores, Interfaces, 17 (2), p.52–63.
- Yu, M., Qi X., 2014, A vehicle routing problem with multiple overlapped batches, Transportation Research Part E, 61, p.40-55.
- Zachariadis, E.E, Kiranoudis C. T., 2012, An effective local search approach for the Vehicle Routing Problem with Backhauls , Expert Systems with Applications, 39, p. 3174-3184.

Ek Açıklamalar-A

Test Problemlerinin Özellikleri

No	İsim	L	B	Q	K
1	A1	20	5	1550	8
2	A2	20	5	2550	5
3	A3	20	5	4050	4
4	A4	20	5	4050	3
5	B1	20	10	1600	7
6	B2	20	10	2600	5
7	B3	20	10	4000	3
8	C1	20	20	1800	7
9	C2	20	20	2600	5
10	C3	20	20	4150	5
11	C4	20	20	4150	4
12	D1	30	8	1700	12
13	D2	30	8	1700	11
14	D3	30	8	2750	7
15	D4	30	8	4075	5
16	E1	30	15	2650	7
17	E2	30	15	4300	4
18	E3	30	15	5225	4
19	F1	30	30	3000	6
20	F2	30	30	3000	7
21	F3	30	30	4400	5
22	F4	30	30	5500	4
23	G1	45	12	2700	10
24	G2	45	12	4300	6
25	G3	45	12	5300	5
26	G4	45	12	5300	6
27	G5	45	12	6400	5
28	G6	45	12	8000	4
29	H1	45	23	4000	6
30	H2	45	23	5100	5
31	H3	45	23	6100	4
32	H4	45	23	6100	5
33	H5	45	23	7100	4
34	H6	45	23	7100	5
35	I1	45	45	3000	10
36	I2	45	45	4000	7
37	I3	45	45	5700	5
38	I4	45	45	5700	6
39	I5	45	45	5700	7
40	J1	75	19	4400	10
41	J2	75	19	5600	8
42	J3	75	19	8200	6
43	J4	75	19	6600	7

Ek Açıklamalar-B

Toplam seyahat mesafesini (Z_1) enküçükleyen model için test problemlerinin sonuçları

A1 Test Problemi

-----Best Path 1-----

1-> 0-19-17-21-0: Distance Cost => 24583,22500528, FCC Cost => 11508,4682451982
 2-> 0-8-20-7-5-23-0: Distance Cost => 42904,2597441246, FCC Cost => 25305,799213514
 3-> 0-11-9-24-0: Distance Cost => 39465,8542111873, FCC Cost => 18569,2961775147
 4-> 0-1-14-18-0: Distance Cost => 35882,2224785458, FCC Cost => 14383,8827174035
 5-> 0-13-2-16-0: Distance Cost => 29735,8289760725, FCC Cost => 8929,33079001941
 6-> 0-6-0: Distance Cost => 10758,4281379763, FCC Cost => 1241,46343576771
 7-> 0-4-15-12-25-0: Distance Cost => 30425,8190565634, FCC Cost => 16024,1858678049
 8-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283
 Best Cost Distance: 229885,645391639
 Cost FCC: 104694,753872985
 Total Computation Time (Initial+Best): 12,2761234

-----Best Path 5-----

1-> 0-11-9-24-0: Distance Cost => 39465,8542111873, FCC Cost => 18569,2961775147
 2-> 0-4-15-12-25-0: Distance Cost => 30425,8190565634, FCC Cost => 16024,1858678049
 3-> 0-8-20-7-5-23-0: Distance Cost => 42904,2597441246, FCC Cost => 25305,799213514
 4-> 0-18-14-1-0: Distance Cost => 35882,2224785458, FCC Cost => 10495,1306937079
 5-> 0-19-17-21-0: Distance Cost => 24583,22500528, FCC Cost => 11508,4682451982
 6-> 0-6-0: Distance Cost => 10758,4281379763, FCC Cost => 1241,46343576771
 7-> 0-13-2-16-0: Distance Cost => 29735,8289760725, FCC Cost => 8929,33079001941
 8-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283
 Best Cost Distance: 229885,645391639
 Cost FCC: 100806,00184929
 Total Computation Time (Initial+Best): 11,2419972

A2 Test Problem1

-----Best Path 1-----

1-> 0-6-20-8-12-25-0: Distance Cost => 37493,2044737945, FCC Cost => 21469,3861943277

2-> 0-11-16-9-5-7-23-24-0: Distance Cost => 53968,8714254801, FCC Cost => 38136,764302127

3-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283

4-> 0-13-2-1-14-18-0: Distance Cost => 40391,8588192755, FCC Cost => 20453,8738344791

5-> 0-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 32135,2689321465, FCC Cost => 19015,2224152143

Best Cost Distance: 180119,211432585

Cost FCC: 107807,574171911

Total Computation Time (Initial+Best): 14,551066

-----Best Path 4-----

1-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283

2-> 0-13-2-1-14-18-0: Distance Cost => 40391,8588192755, FCC Cost => 20453,8738344791

3-> 0-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 32135,2689321465, FCC Cost => 19015,2224152143

4-> 0-6-20-8-12-25-0: Distance Cost => 37493,2044737945, FCC Cost => 21469,3861943277

5-> 0-11-16-9-5-7-23-24-0: Distance Cost => 53968,8714254801, FCC Cost => 38136,764302127

Best Cost Distance: 180119,211432585

Cost FCC: 107807,574171911

Total Computation Time (Initial+Best): 14,4294181

-----Best Path 9-----

1-> 0-11-16-9-5-7-23-24-0: Distance Cost => 53968,8714254801, FCC Cost => 38136,764302127

2-> 0-18-14-1-2-13-0: Distance Cost => 40391,8588192755, FCC Cost => 19645,9455040111

3-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283

4-> 0-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 32135,2689321465, FCC Cost => 19015,2224152143

5-> 0-6-20-8-12-25-0: Distance Cost => 37493,2044737945, FCC Cost => 21469,3861943277

Best Cost Distance: 180119,211432585

Cost FCC: 106999,645841443

Total Computation Time (Initial+Best): 14,3976214

-----Best Path 15-----

1-> 0-11-16-9-5-7-23-24-0: Distance Cost => 53968,8714254801, FCC Cost => 38136,764302127

2-> 0-10-3-22-0: Distance Cost => 16130,0077818889, FCC Cost => 8732,32742576283

3-> 0-13-2-1-14-18-0: Distance Cost => 40391,8588192755, FCC Cost => 20453,8738344791

4-> 0-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 32135,2689321465, FCC Cost => 19015,2224152143

5-> 0-6-20-8-12-25-0: Distance Cost => 37493,2044737945, FCC Cost => 21469,3861943277

Best Cost Distance: 180119,211432585

Cost FCC: 107807,574171911

Total Computation Time (Initial+Best): 14,4926835

A3 Test Problem

-----Best Path 7-----

1-> 0-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 32135,2689321465, FCC Cost => 19015,2224152143

2-> 0-13-18-14-1-2-11-16-9-24-0: Distance Cost => 68478,1774247993, FCC Cost => 58931,5350335883

3-> 0-6-10-3-8-20-7-5-23-22-0: Distance Cost => 48608,4268396858, FCC Cost => 35776,4284390022

4-> 0-12-25-0: Distance Cost => 14183,5094496534, FCC Cost => 5187,62089682618

Best Cost Distance: 163405,302572088

Cost FCC: 119781,348862457

Total Computation Time (Initial+Best): 14,0595835

A4 Test Problem

-----Best Path 1-----

1-> 0-6-10-3-8-20-7-5-23-22-25-0: Distance Cost => 51501,1354106148, FCC Cost => 38149,1227652491

2-> 0-13-18-14-1-2-11-16-9-24-0: Distance Cost => 68478,1774247993, FCC Cost => 58931,5350335883

3-> 0-12-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 35817,0959728962, FCC Cost => 24014,6867407546

Best Cost Distance: 155796,40880831

Cost FCC: 121095,344539592

Total Computation Time (Initial+Best): 18,0356309

-----Best Path 6-----

1-> 0-12-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 35817,0959728962, FCC Cost => 24014,6867407546

2-> 0-13-18-14-1-2-11-16-9-24-0: Distance Cost => 68478,1774247993, FCC Cost => 58931,5350335883

3-> 0-6-10-3-8-20-7-5-23-22-25-0: Distance Cost => 51501,1354106148, FCC Cost => 38149,1227652491

Best Cost Distance: 155796,40880831

Cost FCC: 121095,344539592

Total Computation Time (Initial+Best): 18,2384313

-----Best Path 10-----

1-> 0-6-10-3-8-20-7-5-23-22-25-0: Distance Cost => 51501,1354106148, FCC Cost => 38149,1227652491

2-> 0-13-18-14-1-2-11-16-9-24-0: Distance Cost => 68478,1774247993, FCC Cost => 58931,5350335883

3-> 0-12-4-19-15-17-21-0: Distance Cost => 35817,0959728962, FCC Cost => 24014,6867407546

Best Cost Distance: 155796,40880831

Cost FCC: 121095,344539592

Total Computation Time (Initial+Best): 18,9404325

B1 Test Problem1

-----Best Path 10-----

1-> 0-12-13-8-22-27-0: Distance Cost => 51343,1309711897, FCC Cost => 32622,3984463206

2-> 0-2-7-5-9-25-0: Distance Cost => 30296,6410978361, FCC Cost => 14223,6603349232

3-> 0-17-16-21-0: Distance Cost => 18533,302884124, FCC Cost => 8444,13265566868

4-> 0-3-18-0: Distance Cost => 15959,7895495001, FCC Cost => 3860,79999035302

5-> 0-4-14-11-24-23-0: Distance Cost => 46732,9901221756, FCC Cost => 19890,0063351613

6-> 0-6-1-10-30-28-0: Distance Cost => 29313,0429210369, FCC Cost => 12633,4964204882

7-> 0-15-20-19-29-26-0: Distance Cost => 46901,2620621445, FCC Cost => 25867,5239338105

Best Cost Distance: 239080,159608007

Cost FCC: 117542,018116725

Total Computation Time (Initial+Best): 25,1541213

B2 Test Problem1

-----Best Path 9-----

1-> 0-12-13-8-22-27-0: Distance Cost => 51343,1309711897, FCC Cost => 16755,7228617188

2-> 0-16-17-19-29-26-21-0: Distance Cost => 32575,4319765188, FCC Cost => 7882,9457773476

3-> 0-6-15-20-1-10-30-28-0: Distance Cost => 42659,3433051282, FCC Cost => 13638,5422340482

4-> 0-2-7-5-4-9-25-0: Distance Cost => 31347,7786468547, FCC Cost => 7991,51741020103

5-> 0-3-18-14-11-24-23-0: Distance Cost => 40567,2630008222, FCC Cost => 5727,65769059702

Best Cost Distance: 198492,947900514

Cost FCC: 113671,67000862

Total Computation Time (Initial+Best): 25,544529

B3 Test Problem1

-----Best Path 6-----

1-> 0-11-3-18-14-25-0: Distance Cost => 44945,2721498211, FCC Cost => 27084,5378308707

2-> 0-2-7-5-4-9-12-8-13-27-22-29-26-21-0: Distance Cost => 67303,1167519391, FCC Cost => 55290,4505237646

3-> 0-16-17-19-20-15-6-1-10-30-24-23-28-0: Distance Cost => 57123,9047538614, FCC Cost => 45269,1540292985

Best Cost Distance: 169372,293655622

Cost FCC: 127644,142383934

Total Computation Time (Initial+Best): 21,0920363

-----Best Path 10-----

1-> 0-16-17-19-20-15-6-1-10-30-24-23-28-0: Distance Cost => 57123,9047538614, FCC Cost => 45269,1540292985

2-> 0-11-3-18-14-25-0: Distance Cost => 44945,2721498211, FCC Cost => 27084,5378308707

3-> 0-2-7-5-4-9-12-8-13-27-22-29-26-21-0: Distance Cost => 67303,1167519391, FCC Cost => 55290,4505237646

Best Cost Distance: 169372,293655622

Cost FCC: 127644,142383934

Total Computation Time (Initial+Best): 21,0820363

C1 Test Problem1

-----Best Path 3-----

1-> 0-15-14-5-10-33-38-32-30-0: Distance Cost => 45842,3666687301, FCC Cost => 31554,6687496916

2-> 0-6-8-13-36-34-0: Distance Cost => 30746,5996279462, FCC Cost => 16882,3711174469

3-> 0-7-17-11-26-29-40-0: Distance Cost => 36065,8830743854, FCC Cost => 22665,0156199279

4-> 0-18-19-21-0: Distance Cost => 18936,7494558118, FCC Cost => 7925,91133003134

5-> 0-1-12-9-37-25-31-0: Distance Cost => 46043,7802410182, FCC Cost => 24428,7622048976

6-> 0-2-20-3-22-27-35-0: Distance Cost => 43357,2106117423, FCC Cost => 24143,9475499233

7-> 0-4-16-39-23-28-24-0: Distance Cost => 34336,8768217162, FCC Cost => 20335,0203459492

Best Cost Distance: 255329,46650135

Cost FCC: 147935,696917868

Total Computation Time (Initial+Best): 30,1547723

C2 Test Problem1

-----Best Path 3-----

1-> 0-2-15-14-5-10-33-38-32-27-30-0: Distance Cost => 48768,2959633985, FCC Cost => 36380,7837086976

2-> 0-6-9-37-25-0: Distance Cost => 29484,010094021, FCC Cost => 14177,4226675485

3-> 0-8-18-19-13-21-36-34-31-0: Distance Cost => 36374,7592368987, FCC Cost => 24447,5395276086

4-> 0-7-17-11-20-3-22-40-29-26-0: Distance Cost => 52183,0998821328, FCC Cost => 39503,5740244011

5-> 0-1-12-4-16-39-23-28-24-35-0: Distance Cost => 48210,0623613963, FCC Cost => 33452,6026109961

Best Cost Distance: 215020,227537847

Cost FCC: 147961,922539252

Total Computation Time (Initial+Best): 31,8828236

C3 Test Problem1

-----Best Path 10-----

1-> 0-8-18-19-13-21-36-0: Distance Cost => 35702,0982394354, FCC Cost => 33098,3943358498

2-> 0-9-4-16-39-23-28-24-37-25-34-31-0: Distance Cost => 58029,7639446891, FCC Cost => 69373,8185636957

3-> 0-1-12-5-14-15-10-33-38-32-27-30-35-0: Distance Cost => 52241,4880774277, FCC Cost => 59188,1940369046

4-> 0-6-0: Distance Cost => 4435,73218307869, FCC Cost => 1273,40555938605

5-> 0-2-7-17-11-20-3-22-40-29-26-0: Distance Cost => 55430,1102432318, FCC Cost => 63640,386850632

Best Cost Distance: 200585,672163683

Cost FCC: 162511,113689488

Total Computation Time (Initial+Best): 28,2360496

C4 Test Problem i

-----Best Path 13-----

1-> 0-9-4-16-39-23-28-0: Distance Cost => 38713,7769073924, FCC Cost => 22010,0784544896

2-> 0-2-7-17-11-20-3-15-22-40-29-26-0: Distance Cost => 62189,4723099354, FCC Cost => 51017,4074815238

3-> 0-1-12-14-5-10-33-38-32-27-30-35-0: Distance Cost => 42903,4948471983, FCC Cost => 32836,7007128784

4-> 0-6-8-18-19-13-21-31-34-36-25-37-24-0: Distance Cost => 53701,8636649458, FCC Cost => 52762,9806254558

Best Cost Distance: 197508,607729472

Cost FCC: 158627,167274348

Total Computation Time (Initial+Best): 34,1752903

D1 Test Problem i

-----Best Path 10-----

1-> 0-11-27-30-32-0: Distance Cost => 33745,1942112201, FCC Cost => 17599,6374517018

2-> 0-21-28-14-0: Distance Cost => 29613,6122447185, FCC Cost => 10214,3182502741

3-> 0-5-16-38-0: Distance Cost => 39692,2138746825, FCC Cost => 20781,1277997694

4-> 0-13-29-0: Distance Cost => 17924,365128303, FCC Cost => 4590,66243922977

5-> 0-1-8-20-0: Distance Cost => 23882,6249478921, FCC Cost => 8546,1326792416

6-> 0-23-15-35-34-0: Distance Cost => 31073,4614959668, FCC Cost => 18567,679515776

7-> 0-12-18-24-36-33-0: Distance Cost => 33697,5054336294, FCC Cost => 19911,0433172855

8-> 0-2-17-25-0: Distance Cost => 17697,493618637, FCC Cost => 6837,25861206044
 9-> 0-4-19-9-31-0: Distance Cost => 36635,673819372, FCC Cost => 16871,5988812854
 10-> 0-6-22-3-0: Distance Cost => 27707,2400249025, FCC Cost => 8586,82445249346
 11-> 0-7-0: Distance Cost => 4235,62510144607, FCC Cost => 488,767840768818
 12-> 0-26-10-37-0: Distance Cost => 26625,1213535644, FCC Cost => 13380,5942665176
 Best Cost Distance: 322530,131254334
 Cost FCC: 146375,645506404
 Total Computation Time (Initial+Best): 38,3643895

D2 Test Problem i

-----Best Path 10-----

1-> 0-4-12-18-24-36-33-0: Distance Cost => 36084,763848538, FCC Cost => 22293,6020168864
 2-> 0-13-19-9-31-0: Distance Cost => 40679,70761897, FCC Cost => 20118,2169956921
 3-> 0-3-1-8-32-0: Distance Cost => 29389,1374025309, FCC Cost => 16214,7112846052
 4-> 0-20-2-17-0: Distance Cost => 19556,6323952133, FCC Cost => 5521,0482918501
 5-> 0-22-6-29-0: Distance Cost => 23727,1094415434, FCC Cost => 8914,46417531439
 6-> 0-21-28-14-0: Distance Cost => 29613,6122447185, FCC Cost => 10214,3182502741
 7-> 0-7-0: Distance Cost => 4235,62510144607, FCC Cost => 488,767840768818
 8-> 0-11-27-30-0: Distance Cost => 28145,8238871688, FCC Cost => 8813,80640672704
 9-> 0-5-16-38-0: Distance Cost => 39692,2138746825, FCC Cost => 20781,1277997694
 10-> 0-25-10-26-37-0: Distance Cost => 34510,7728232605, FCC Cost => 18879,5387080514
 11-> 0-23-15-35-34-0: Distance Cost => 31073,4614959668, FCC Cost => 18567,679515776
 Best Cost Distance: 316708,860134039
 Cost FCC: 150807,281285715
 Total Computation Time (Initial+Best): 38,1061767

D3 Test Problem i

-----Best Path 12-----

1-> 0-2-20-8-1-3-32-0: Distance Cost => 35151,0872345426, FCC Cost => 21714,3490313031
 2-> 0-28-14-24-18-12-0: Distance Cost => 34722,119646947, FCC Cost => 17977,7382550647

3-> 0-4-19-9-31-36-33-0: Distance Cost => 41369,9074735315, FCC Cost => 23803,021746243

4-> 0-25-17-30-27-11-0: Distance Cost => 28369,3330262131, FCC Cost => 10553,6454546326

5-> 0-23-15-5-16-38-35-34-0: Distance Cost => 48060,4536877337, FCC Cost =>
36114,9933657777

6-> 0-7-29-13-6-22-0: Distance Cost => 23911,9554979463, FCC Cost => 8584,30950678692

7-> 0-21-26-10-37-0: Distance Cost => 27893,7759798995, FCC Cost => 16295,9134972042

Best Cost Distance: 239478,632546814

Cost FCC: 135043,970857012

Total Computation Time (Initial+Best): 36,9681493

D4 Test Problem i

-----Best Path 6-----

1-> 0-4-19-9-12-18-24-36-33-31-0: Distance Cost => 55355,8915909922, FCC Cost =>
61413,8117363039

2-> 0-8-1-3-22-6-13-29-0: Distance Cost => 31024,5987806049, FCC Cost => 34563,6538727819

3-> 0-20-2-17-25-11-27-30-32-0: Distance Cost => 39945,6082477376, FCC Cost =>
43026,1385795063

4-> 0-7-21-26-10-37-0: Distance Cost => 31829,5760382998, FCC Cost => 31141,3099154078

5-> 0-14-28-23-15-5-16-38-35-34-0: Distance Cost => 53154,824002013, FCC Cost =>
64470,7128956266

Best Cost Distance: 211310,498659648

Cost FCC: 234615,626999627

Total Computation Time (Initial+Best): 31,0834263

E1 Test Problem i

-----Best Path 2-----

1-> 0-18-19-29-0: Distance Cost => 8475,33399858907, FCC Cost => 2990,96578783537

2-> 0-27-11-5-14-38-32-43-0: Distance Cost => 42181,8307151241, FCC Cost =>
30493,9696228331

3-> 0-17-25-7-28-0: Distance Cost => 18303,0454364343, FCC Cost => 8500,86158122633

4-> 0-6-22-9-24-15-36-42-34-31-44-0: Distance Cost => 48281,6905965163, FCC Cost =>
29398,5191864203

5-> 0-13-16-30-20-26-10-33-37-39-0: Distance Cost => 43952,6908795887, FCC Cost => 27545,3209541588

6-> 0-12-1-21-4-0: Distance Cost => 28254,7032771759, FCC Cost => 13676,0203583794

7-> 0-8-2-23-3-40-41-35-45-0: Distance Cost => 54040,3022932833, FCC Cost => 37654,525791743

Best Cost Distance: 243489,597196712

Cost FCC: 150260,183282596

Total Computation Time (Initial+Best): 31,849375

E2 Test Problem i

-----Best Path 10-----

1-> 0-6-22-9-24-15-20-30-26-10-33-37-39-36-42-34-44-0: Distance Cost => 81904,9747850305, FCC Cost => 102449,236830401

2-> 0-28-7-12-1-21-4-16-13-0: Distance Cost => 37847,1923322275, FCC Cost => 45177,567081791

3-> 0-17-25-27-11-5-14-38-32-43-0: Distance Cost => 42357,7224527387, FCC Cost => 48557,9678333486

4-> 0-29-19-18-8-2-23-3-40-41-35-45-31-0: Distance Cost => 56111,2823194925, FCC Cost => 60808,995568037

Best Cost Distance: 218221,171889489

Cost FCC: 256993,767313578

Total Computation Time (Initial+Best): 38,2915391

E3 Test Problem i

-----Best Path 7-----

1-> 0-29-19-18-8-6-22-9-24-15-20-36-42-34-0: Distance Cost => 57561,3471480806, FCC Cost => 57365,9707659051

2-> 0-13-16-30-26-10-33-37-39-0: Distance Cost => 37032,5833979664, FCC Cost => 35261,6251258605

3-> 0-28-7-25-27-11-5-14-38-32-43-0: Distance Cost => 44712,2403831288, FCC Cost => 54146,6751877518

4-> 0-4-21-1-12-17-2-23-3-40-41-35-45-31-44-0: Distance Cost => 73827,9221605241, FCC Cost => 93276,9408329132

Best Cost Distance: 213134,0930897

Cost FCC: 240051,211912431

Total Computation Time (Initial+Best): 29,8031872

F1 Test Problem1

-----Best Path 1-----

1-> 0-16-8-15-23-21-18-60-34-42-59-32-31-0: Distance Cost => 66529,9853272782, FCC Cost => 75730,0791574969

2-> 0-4-27-11-12-51-54-48-50-0: Distance Cost => 32184,8472241667, FCC Cost => 35895,6578742265

3-> 0-1-28-3-5-9-45-49-47-52-36-0: Distance Cost => 49833,5869492825, FCC Cost => 52735,2562631855

4-> 0-7-30-2-19-20-35-56-46-41-0: Distance Cost => 47791,3670039225, FCC Cost => 50267,121850363

5-> 0-25-17-26-10-6-22-55-40-53-58-39-0: Distance Cost => 36759,9293109916, FCC Cost => 38906,4082371704

6-> 0-14-24-13-29-43-44-38-57-37-33-0: Distance Cost => 44001,5817200897, FCC Cost => 54073,5699817615

Best Cost Distance: 277101,297535731

Cost FCC: 307608,093364204

Total Computation Time (Initial+Best): 41,3944649

F2 Test Problem1

-----Best Path 9-----

1-> 0-8-15-23-21-18-12-51-54-48-50-0: Distance Cost => 49546,5685460486, FCC Cost => 57660,2500532731

2-> 0-26-10-6-22-55-40-53-58-0: Distance Cost => 32962,289350329, FCC Cost => 32412,3002675414

3-> 0-25-17-4-27-11-60-34-42-59-32-0: Distance Cost => 40315,1646876935, FCC Cost => 45801,0223990022

4-> 0-3-56-46-41-39-0: Distance Cost => 18407,8595801186, FCC Cost => 16384,4562601593

5-> 0-7-16-2-19-20-35-38-57-37-33-31-0: Distance Cost => 56618,2412586927, FCC Cost => 62583,7593185484

6-> 0-13-24-29-30-43-44-36-0: Distance Cost => 32940,9845086148, FCC Cost => 34122,811521962

7-> 0-1-28-14-5-9-45-49-47-52-0: Distance Cost => 45992,6337797074, FCC Cost => 48082,7878430325

Best Cost Distance: 276783,741711205

Cost FCC: 297047,387663519

Total Computation Time (Initial+Best): 42,0601582

F3 Test Problem

-----Best Path 15-----

1-> 0-1-3-5-9-10-26-6-22-55-45-49-47-58-40-53-39-0: Distance Cost => 68583,3585879882, FCC Cost => 87062,7689149946

2-> 0-11-27-4-59-34-42-32-50-0: Distance Cost => 38936,0112122973, FCC Cost => 41882,4190305322

3-> 0-29-30-2-19-20-35-38-57-44-43-36-0: Distance Cost => 48894,7001212402, FCC Cost => 54600,2316389939

4-> 0-7-16-13-24-14-28-56-46-41-52-0: Distance Cost => 36664,0869662238, FCC Cost => 48262,1226909178

5-> 0-17-25-12-18-21-23-15-8-37-33-48-51-54-60-31-0: Distance Cost => 66642,2577596478, FCC Cost => 87987,1034209882

Best Cost Distance: 259720,414647397

Cost FCC: 319794,645696427

Total Computation Time (Initial+Best): 39,6621548

F4 Test Problem

-----Best Path 6-----

1-> 0-25-26-6-22-10-9-5-49-45-55-42-34-60-59-32-39-0: Distance Cost => 85679,1541192493, FCC Cost => 107743,785429161

2-> 0-29-30-2-19-20-35-38-57-44-43-36-46-41-0: Distance Cost => 55379,4747421144, FCC Cost => 67823,2668353916

3-> 0-17-4-27-11-12-18-21-15-23-8-37-33-48-54-51-50-31-0: Distance Cost => 64618,1230415388, FCC Cost => 88512,823687423

4-> 0-7-16-13-24-14-28-3-1-56-52-47-58-53-40-0: Distance Cost => 45885,9475896967, FCC Cost => 63280,2469750223

Best Cost Distance: 251562,699492599

Cost FCC: 327360,122926998

Total Computation Time (Initial+Best): 40,3134851

G1 Test Problem

-----Best Path 7-----

1-> 0-41-22-40-6-0: Distance Cost => 26096,4987653508, FCC Cost => 12096,2841839349

2-> 0-34-26-21-5-16-50-55-51-49-52-0: Distance Cost => 52959,3690894327, FCC Cost => 40469,1817823077

3-> 0-4-29-13-44-42-0: Distance Cost => 21994,0903235827, FCC Cost => 11185,1618909686

4-> 0-19-43-9-33-12-0: Distance Cost => 38979,4945180193, FCC Cost => 22328,8450635472

5-> 0-2-20-32-38-37-56-0: Distance Cost => 41872,6155311305, FCC Cost => 26164,5300967234

6-> 0-15-23-36-10-46-57-48-0: Distance Cost => 36644,6772579538, FCC Cost => 28649,1875035975

7-> 0-39-18-24-14-28-54-0: Distance Cost => 34050,3415889279, FCC Cost => 24211,591040894

8-> 0-25-17-11-27-30-47-0: Distance Cost => 30673,278384594, FCC Cost => 20373,7498379716

9-> 0-31-7-0: Distance Cost => 5995,28652456187, FCC Cost => 1398,30457422843

10-> 0-45-8-35-3-1-53-0: Distance Cost => 27691,3187132342, FCC Cost => 18411,5901600359

Best Cost Distance: 316956,970696788

Cost FCC: 205288,426134209

Total Computation Time (Initial+Best): 41,4449664

G2 Test Problem

-----Best Path 8-----

1-> 0-41-22-40-6-13-29-44-42-0: Distance Cost => 28930,9216544494, FCC Cost => 35713,6406926003

2-> 0-28-14-39-18-24-16-5-50-55-51-49-52-54-0: Distance Cost => 54602,9454531496, FCC Cost => 67585,3347019775

3-> 0-31-7-4-19-43-9-33-12-0: Distance Cost => 41015,50787724, FCC Cost => 40800,2888260974

4-> 0-34-23-15-21-26-36-10-46-57-48-0: Distance Cost => 42469,3632493211, FCC Cost => 57261,7460829132

5-> 0-8-1-3-35-32-38-37-56-0: Distance Cost => 43947,2140482324, FCC Cost => 49312,340056084

6-> 0-45-20-2-17-25-11-27-30-47-53-0: Distance Cost => 36073,2045669181, FCC Cost => 42230,1064132533

Best Cost Distance: 247039,156849311

Cost FCC: 292903,456772926

Total Computation Time (Initial+Best): 38,3568457

G3 Test Problem

-----Best Path 9-----

1-> 0-41-1-8-32-38-37-35-3-56-0: Distance Cost => 43838,4801577167, FCC Cost => 53525,8597438759

2-> 0-34-31-45-20-2-17-25-11-27-30-47-53-0: Distance Cost => 42726,7368603795, FCC Cost => 56904,620220114

3-> 0-7-4-29-40-22-6-13-44-42-0: Distance Cost => 31101,1567783715, FCC Cost => 39352,4934819691

4-> 0-39-12-9-19-43-33-18-24-16-5-50-55-51-49-52-54-0: Distance Cost => 72553,1913135975, FCC Cost => 106666,392528619

5-> 0-14-28-15-23-21-26-36-10-46-57-48-0: Distance Cost => 43831,504248752, FCC Cost => 63763,2627560224

Best Cost Distance: 234051,069358817

Cost FCC: 320212,628730601

Total Computation Time (Initial+Best): 36,5111634

G4 Test Problem

-----Best Path 6-----

1-> 0-42-44-29-13-6-40-22-41-53-0: Distance Cost => 29967,405578133, FCC Cost => 36848,617661413

2-> 0-7-0: Distance Cost => 4395,8161926996, FCC Cost => 1261,94651678401

3-> 0-39-18-24-5-15-21-26-36-10-46-57-48-0: Distance Cost => 61104,6516440182, FCC Cost => 95510,080065574

4-> 0-34-20-2-17-25-11-27-30-47-0: Distance Cost => 37035,4951984169, FCC Cost => 43909,5667259264

5-> 0-31-45-8-1-32-38-37-35-3-56-0: Distance Cost => 45034,7774925957, FCC Cost => 56141,9203841875

6-> 0-4-19-43-9-33-12-14-28-23-16-50-55-51-49-52-54-0: Distance Cost => 71271,8410746993, FCC Cost => 102404,555102383

Best Cost Distance: 248809,987180563

Cost FCC: 336076,686456267

Total Computation Time (Initial+Best): 41,3285421

G5 Test Problem

-----Best Path 9-----

1-> 0-31-7-0: Distance Cost => 5995,28652456187, FCC Cost => 3456,90011288071

2-> 0-24-18-33-43-19-9-12-39-14-28-16-5-50-55-51-49-52-54-0: Distance Cost => 80933,286582652, FCC Cost => 134707,7551558

3-> 0-4-29-40-22-6-13-44-42-41-53-0: Distance Cost => 34380,9619839721, FCC Cost => 47812,95782009

4-> 0-34-23-15-21-26-36-10-11-27-30-47-48-57-46-0: Distance Cost => 68133,5182142531, FCC Cost => 99060,2844695629

5-> 0-45-25-17-2-20-8-1-32-38-37-35-3-56-0: Distance Cost => 50028,4571883503, FCC Cost => 71627,8870294869

Best Cost Distance: 239471,510493789

Cost FCC: 356665,78458782

Total Computation Time (Initial+Best): 41,107673

G6 Test Problem

-----Best Path 10-----

1-> 0-34-45-25-17-11-27-30-38-20-2-47-0: Distance Cost => 52538,3262798051, FCC Cost => 68721,2108775256

2-> 0-39-14-28-15-23-21-26-36-10-46-57-48-54-0: Distance Cost => 48006,1174457537, FCC Cost => 71647,4471105455

3-> 0-31-41-42-4-12-19-43-9-33-18-24-16-5-50-55-51-49-52-0: Distance Cost => 77802,5244691248, FCC Cost => 119990,490514171

4-> 0-7-44-29-13-6-40-22-1-8-32-3-35-37-56-53-0: Distance Cost => 52012,9642114824, FCC Cost => 78337,9193783854

Best Cost Distance: 230359,932406166

Cost FCC: 338697,067880627

Total Computation Time (Initial+Best): 36,6906498

H1 Test Problem

-----Best Path 12-----

1-> 0-10-8-32-25-17-14-36-24-42-52-54-53-60-0: Distance Cost => 50376,7726932561, FCC Cost => 52900,9853527489

2-> 0-19-43-22-7-31-18-9-6-20-56-62-68-66-50-55-0: Distance Cost => 54157,7599557691, FCC Cost => 74501,2639570312

3-> 0-1-4-34-12-41-38-0: Distance Cost => 25721,8749886148, FCC Cost => 26835,8613648746

4-> 0-28-5-40-37-26-30-45-47-65-51-49-59-58-63-0: Distance Cost => 66286,1691719876, FCC Cost => 75156,1975255959

5-> 0-21-16-44-2-39-3-64-0: Distance Cost => 33734,2648281889, FCC Cost => 34929,2595259551

6-> 0-15-23-29-13-35-33-27-11-48-67-61-46-57-0: Distance Cost => 52567,2647037535, FCC Cost => 70156,9110456034

Best Cost Distance: 282844,10634157

Cost FCC: 334480,478771809

Total Computation Time (Initial+Best): 46,2753402

H2 Test Problem i

-----Best Path 9-----

1-> 0-21-1-4-34-12-40-37-26-5-38-0: Distance Cost => 42027,9765896257, FCC Cost => 55086,5557544505

2-> 0-41-19-43-22-7-31-18-9-6-20-56-62-68-66-50-55-0: Distance Cost => 56100,3770880636, FCC Cost => 79615,9905552476

3-> 0-15-23-3-35-39-33-27-11-44-2-16-46-61-48-67-57-64-0: Distance Cost => 67354,3292324975, FCC Cost => 103728,621503189

4-> 0-17-25-32-14-36-24-29-13-53-54-52-59-63-60-0: Distance Cost => 47894,8404803974, FCC Cost => 53672,0879895094

5-> 0-28-10-8-42-30-45-47-65-51-49-58-0: Distance Cost => 60075,3467976872, FCC Cost => 62178,6193207339

Best Cost Distance: 273452,870188271

Cost FCC: 354281,87512313

Total Computation Time (Initial+Best): 43,9711569

H3 Test Problem i

-----Best Path 6-----

1-> 0-10-8-42-24-36-14-3-35-33-27-11-48-67-61-46-57-64-0: Distance Cost => 69252,1238688601, FCC Cost => 102848,135909269

2-> 0-37-40-22-31-7-18-9-6-20-43-19-12-4-34-0: Distance Cost => 56723,0604334419, FCC Cost => 85211,3888505251

3-> 0-17-25-32-28-38-5-26-30-45-47-65-62-56-68-66-50-55-0: Distance Cost => 76434,7796933993, FCC Cost => 99664,9058896987

4-> 0-41-1-39-16-44-2-21-15-23-29-13-53-54-52-59-49-51-58-63-60-0: Distance Cost => 76350,1223350807, FCC Cost => 113400,229387376

Best Cost Distance: 278760,086330782

Cost FCC: 401124,66003687

Total Computation Time (Initial+Best): 73,8528016

H4 Test Problem

-----Best Path 13-----

1-> 0-10-26-30-45-47-65-51-49-52-54-59-58-63-0: Distance Cost => 64838,4532921277, FCC Cost => 74657,8193589417

2-> 0-28-5-37-40-19-43-31-22-7-18-9-6-20-56-62-68-66-50-55-0: Distance Cost => 60722,2977165621, FCC Cost => 91248,9356208838

3-> 0-12-4-44-11-27-33-35-3-23-15-29-13-53-64-0: Distance Cost => 60179,3146397811, FCC Cost => 95590,3097135309

4-> 0-8-42-24-36-14-25-32-17-60-0: Distance Cost => 34967,4804802582, FCC Cost => 42090,1767097285

5-> 0-38-41-34-1-21-39-16-2-57-67-48-61-46-0: Distance Cost => 45418,3232052431, FCC Cost => 57762,67149117

Best Cost Distance: 266125,869333972

Cost FCC: 361349,912894255

Total Computation Time (Initial+Best): 44,6236019

H5 Test Problem

-----Best Path 12-----

1-> 0-41-34-12-19-40-37-5-26-30-45-47-65-51-49-52-54-59-58-63-0: Distance Cost => 87134,037040438, FCC Cost => 116387,817970472

2-> 0-10-8-42-24-36-14-29-13-23-15-3-35-27-11-48-67-61-46-57-64-53-60-0: Distance Cost => 84549,0671944964, FCC Cost => 139435,133406849

3-> 0-38-28-32-25-17-21-16-2-39-33-44-4-1-0: Distance Cost => 47701,8589746731, FCC Cost => 67487,8300278183

4-> 0-43-22-31-7-18-9-6-20-56-62-68-66-50-55-0: Distance Cost => 53816,5348965675, FCC Cost => 72573,2661819487

Best Cost Distance: 273201,498106175

Cost FCC: 395884,047587088

Total Computation Time (Initial+Best): 47,3304181

H6 Test Problem

-----Best Path 12-----

1-> 0-5-37-40-43-19-31-22-7-18-9-6-20-56-62-68-66-50-55-0: Distance Cost => 60353,629999881, FCC Cost => 89702,339412872

2-> 0-17-21-44-2-33-27-11-48-67-61-46-57-64-0: Distance Cost => 51069,7671674417, FCC Cost => 68459,6194815761

3-> 0-26-30-45-47-65-51-49-52-54-59-58-0: Distance Cost => 61915,1824816999, FCC Cost => 69045,6267721118

4-> 0-10-8-32-14-36-42-24-29-15-23-13-53-0: Distance Cost => 47500,1088830927, FCC Cost => 60846,3392888381

5-> 0-28-38-41-12-34-4-1-16-39-35-3-25-60-63-0: Distance Cost => 51016,5880971182, FCC Cost => 72962,4768796393

Best Cost Distance: 271855,276629233

Cost FCC: 361016,401835037

Total Computation Time (Initial+Best): 45,9933781

I1 Test Problem

-----Best Path 9-----

1-> 0-43-19-2-71-53-50-66-68-63-0: Distance Cost => 30382,8926384867, FCC Cost => 17727,5641590382

2-> 0-10-40-6-44-42-86-70-61-85-62-72-0: Distance Cost => 34321,2854891464, FCC Cost => 22922,8970319238

3-> 0-77-69-0: Distance Cost => 7534,2522835027, FCC Cost => 3028,84973366419

4-> 0-30-24-13-29-16-7-82-88-67-76-0: Distance Cost => 43443,4832002649, FCC Cost => 37393,5558702261

5-> 0-34-35-1-3-28-14-41-65-81-75-46-79-0: Distance Cost => 44647,5974010952, FCC Cost => 39177,9237358236

6-> 0-33-5-37-12-18-52-54-78-48-80-0: Distance Cost => 50455,0213363752, FCC Cost => 41323,1967782001

7-> 0-36-17-25-45-31-74-47-64-90-0: Distance Cost => 37125,908651298, FCC Cost => 33795,0984430255

8-> 0-26-4-27-11-60-55-84-51-49-59-0: Distance Cost => 44393,444863973, FCC Cost => 28433,577721367

9-> 0-9-39-22-8-32-38-58-89-57-0: Distance Cost => 46706,5240989745, FCC Cost => 38937,1186781618

10-> 0-20-21-23-15-87-83-73-56-0: Distance Cost => 34746,2096751095, FCC Cost => 29236,6280429035

Best Cost Distance: 373756,619638226

Cost FCC: 291976,410194334

Total Computation Time (Initial+Best): 81,7788981

I2 Test Problem

-----Best Path 5-----

1-> 0-39-8-32-38-58-67-85-61-76-62-72-0: Distance Cost => 36211,3409164302, FCC Cost => 40263,9529656324

2-> 0-40-22-6-44-42-4-11-27-86-55-84-51-64-49-59-0: Distance Cost => 51442,8197720869, FCC Cost => 63174,4920074613

3-> 0-36-1-35-3-41-28-14-18-12-54-52-78-83-66-77-69-0: Distance Cost => 68327,1176020154, FCC Cost => 87087,5190995854

4-> 0-10-26-17-25-45-31-47-74-60-90-63-0: Distance Cost => 48779,8615431203, FCC Cost => 62860,1059602763

5-> 0-2-20-21-23-15-87-71-53-50-73-68-0: Distance Cost => 42945,7491088351, FCC Cost => 52670,804434148

6-> 0-30-24-13-29-16-7-82-88-89-57-70-56-0: Distance Cost => 49311,5968243536, FCC Cost => 64120,0192086135

7-> 0-9-19-43-34-33-5-37-80-48-46-75-65-81-79-0: Distance Cost => 46054,0296174226, FCC Cost => 61070,2056691098

Best Cost Distance: 343072,515384264

Cost FCC: 431247,099344827

Total Computation Time (Initial+Best): 74,5503732

I3 Test Problem

-----Best Path 9-----

1-> 0-9-29-13-24-21-20-2-15-23-87-71-53-50-66-73-68-77-69-72-0: Distance Cost => 63973,3312260354, FCC Cost => 91767,7206327149

2-> 0-33-37-35-3-41-45-31-74-60-55-86-70-61-49-0: Distance Cost => 70595,8533164998, FCC Cost => 95716,645004305

3-> 0-34-5-43-19-30-16-7-32-8-38-58-82-88-67-89-57-85-76-62-0: Distance Cost => 71651,9907801613, FCC Cost => 109076,203699145

4-> 0-36-10-40-26-1-28-14-18-12-54-52-78-48-80-83-63-56-59-0: Distance Cost => 67277,7096394779, FCC Cost => 90245,1324457543

5-> 0-39-22-6-44-42-4-27-11-25-17-84-51-64-79-47-65-81-75-46-90-0: Distance Cost => 64219,6184574781, FCC Cost => 106955,898956579

Best Cost Distance: 337718,503419652

Cost FCC: 493761,600738498

Total Computation Time (Initial+Best): 90,8791497

I4 Test Problem

-----Best Path 11-----

1-> 0-10-40-22-6-44-42-8-32-38-58-89-57-70-61-85-0: Distance Cost => 50135,3462245915, FCC Cost => 68192,0021898217

2-> 0-43-19-15-23-20-2-30-71-53-50-82-88-67-76-62-72-0: Distance Cost => 52840,3231868719, FCC Cost => 71493,5358510317

3-> 0-39-7-16-29-13-24-21-87-83-73-66-77-69-0: Distance Cost => 52659,1977587225, FCC Cost => 59170,1380173604

4-> 0-26-4-27-11-86-55-60-74-47-65-79-90-0: Distance Cost => 55038,1972290276, FCC Cost => 65678,5613170276

5-> 0-33-9-34-5-37-35-1-64-51-84-49-59-56-63-0: Distance Cost => 44558,6142319199, FCC Cost => 57626,0684146736

6-> 0-36-17-25-45-31-41-3-28-14-18-12-54-78-52-81-75-46-48-80-68-0: Distance Cost => 79043,7739579943, FCC Cost => 119313,568552457

Best Cost Distance: 334275,452589128

Cost FCC: 441473,874342372

Total Computation Time (Initial+Best): 86,346454

I5 Test Problem

-----Best Path 10-----

1-> 0-2-30-29-24-13-16-7-8-32-38-58-67-88-82-62-0: Distance Cost => 67996,351670466, FCC Cost => 97418,4576280163

2-> 0-9-19-20-21-23-15-87-71-53-50-66-0: Distance Cost => 39450,0870717624, FCC Cost => 45788,7480479628

3-> 0-10-36-41-31-74-47-65-56-0: Distance Cost => 38049,1166803896, FCC Cost => 41674,2420185574

4-> 0-26-17-25-45-1-81-46-75-48-80-63-0: Distance Cost => 43091,9221431462, FCC Cost => 54075,418351513

5-> 0-59-49-84-55-60-51-64-79-90-0: Distance Cost => 37892,9256857674, FCC Cost => 55426,540358135

6-> 0-33-34-43-5-37-35-3-28-14-18-12-54-52-78-83-73-68-0: Distance Cost => 62124,694209437, FCC Cost => 85644,2506274923

7-> 0-39-22-40-6-44-42-27-11-4-86-70-57-89-85-61-76-77-69-72-0: Distance Cost => 56662,2488401502, FCC Cost => 80970,2260763852

Best Cost Distance: 345267,346301119

Cost FCC: 460997,883108062

Total Computation Time (Initial+Best): 76,9396509

J1 Test Problem1

-----Best Path 3-----

1-> 0-37-1-23-15-41-50-29-85-86-82-84-92-0: Distance Cost => 46270,4621367593, FCC Cost => 52039,6829155877

2-> 0-69-32-49-8-13-20-26-57-10-0: Distance Cost => 31695,7995481951, FCC Cost => 36097,4059960166

3-> 0-12-33-64-73-52-46-76-0: Distance Cost => 27799,695523098, FCC Cost => 29719,2281184061

4-> 0-9-58-65-71-68-11-27-81-78-80-87-0: Distance Cost => 38946,1135204096, FCC Cost => 53994,9023127471

5-> 0-61-4-44-62-21-77-94-0: Distance Cost => 30465,9197578678, FCC Cost => 31945,4280144431

6-> 0-31-30-40-3-35-67-18-51-59-91-0: Distance Cost => 39316,0523433539, FCC Cost => 49482,1288249808

7-> 0-55-34-74-60-16-17-25-48-79-0: Distance Cost => 26865,584339033, FCC Cost => 28966,5143453306

8-> 0-54-39-66-70-47-43-63-14-83-93-88-0: Distance Cost => 47742,2055635319, FCC Cost => 56655,3432560371

9-> 0-5-7-2-36-38-56-72-75-89-0: Distance Cost => 36091,3662108018, FCC Cost => 48394,5287385788

10-> 0-24-53-45-19-42-6-22-28-90-0: Distance Cost => 37139,4988079816, FCC Cost => 49137,4587064186

Best Cost Distance: 362332,697751032

Cost FCC: 436432,621228546

Total Computation Time (Initial+Best): 85,944155

J2 Test Problem i

-----Best Path 10-----

1-> 0-5-7-31-61-4-51-58-59-91-76-0: Distance Cost => 27533,6556926358, FCC Cost => 33428,2665642704

2-> 0-60-70-47-43-48-16-25-17-72-56-75-89-0: Distance Cost => 44441,0904547983, FCC Cost => 69564,8054215762

3-> 0-33-9-46-52-73-64-28-42-19-6-92-0: Distance Cost => 46460,0064799945, FCC Cost => 62600,4273926348

4-> 0-23-15-53-45-41-26-50-20-13-29-85-86-82-84-0: Distance Cost => 53042,7584640878, FCC Cost => 72106,0026921731

5-> 0-55-34-74-69-10-1-57-24-22-90-0: Distance Cost => 28895,8404909069, FCC Cost => 37197,3425569053

6-> 0-30-62-44-65-71-68-11-27-81-78-80-87-0: Distance Cost => 44499,5980133872, FCC Cost => 66252,5893505885

7-> 0-2-36-38-3-35-67-18-40-21-77-94-0: Distance Cost => 46158,3982484076, FCC Cost => 64146,4420955053

8-> 0-12-37-54-39-32-66-8-49-14-63-93-83-79-88-0: Distance Cost => 46783,8091253437, FCC Cost => 58627,9748049953

Best Cost Distance: 337815,156969562

Cost FCC: 463923,850878649

Total Computation Time (Initial+Best): 70,7084982

J3 Test Problem i

-----Best Path 14-----

1-> 0-33-59-9-46-52-73-64-28-42-53-6-22-90-76-0: Distance Cost => 51383,7571472567, FCC Cost => 83766,3448333928

2-> 0-69-54-39-32-66-49-8-13-50-41-26-15-23-45-19-82-84-92-0: Distance Cost => 59254,2018915071, FCC Cost => 91304,8393774469

3-> 0-37-7-31-55-34-74-60-16-17-25-43-48-79-88-0: Distance Cost => 41321,4657856972, FCC Cost => 57377,2290648277

4-> 0-75-72-56-38-36-3-35-67-18-40-30-61-2-89-0: Distance Cost => 51158,4582409554, FCC Cost => 93237,4662576156

5-> 0-12-10-1-24-57-20-29-14-63-47-70-93-83-85-86-0: Distance Cost => 64326,5165594725, FCC Cost => 81180,5993842158

6-> 0-5-4-58-65-68-11-27-71-51-44-62-21-77-94-81-78-80-87-91-0: Distance Cost => 64451,6506253405, FCC Cost => 97896,2777848102

Best Cost Distance: 331896,050250229

Cost FCC: 504762,756702309

Total Computation Time (Initial+Best): 68,3938746

J4 Test Problem

-----Best Path 14-----

1-> 0-74-34-72-56-38-36-3-35-67-18-40-77-94-91-0: Distance Cost => 52105,8565786332, FCC Cost => 73874,3406193057

2-> 0-7-31-30-62-21-44-51-59-4-2-75-89-0: Distance Cost => 38678,5676389575, FCC Cost => 63962,3472828728

3-> 0-54-39-13-8-49-14-63-43-25-17-16-79-88-93-83-85-86-82-0: Distance Cost => 80278,4216020308, FCC Cost => 118899,157455748

4-> 0-69-32-66-70-47-48-60-55-37-0: Distance Cost => 31855,6455869571, FCC Cost => 41452,0825838042

5-> 0-12-5-61-9-58-65-71-68-11-27-81-78-80-87-0: Distance Cost => 42695,5965750855, FCC Cost => 64155,6932929633

6-> 0-29-20-50-41-57-22-28-64-73-52-46-33-76-0: Distance Cost => 50201,5315551329, FCC Cost => 91615,3044273039

7-> 0-10-1-24-6-53-42-19-45-15-23-26-84-90-92-0: Distance Cost => 45061,8765715474, FCC Cost => 65458,1117481893

Best Cost Distance: 340877,496108344

Cost FCC: 519417,037410187

Total Computation Time (Initial+Best): 73,9112738