

**ÜÇLÜ SORUMLULUK YAKLAŞIMIYLA,
ALTERNATİF BAĞLANTILARI İÇEREN
ARAÇ ROTALAMA MODELLERİ
VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

İlknur TÜKENMEZ

Eskişehir, 2017

**ÜÇLÜ SORUMLULUK YAKLAŞIMIYLA, ALTERNATİF BAĞLANTILARI
İÇEREN ARAÇ ROTALAMA MODELLERİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

İlknur TÜKENMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Onur KAYA

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mayıs 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1606F557 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

İlknur Tükenmez'in "Üçlü Sorumluluk Yaklaşımıyla, Alternatif Bağlantıları İçeren Araç Rotalama Modelleri ve Çözüm Yöntemleri" başlıklı tezi 24/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve SınavYönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	Ünvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Doç.Dr. Onur KAYA
Üye :	Yard.Doç.Dr. Zehra KAMIŞLI ÖZTÜRK
Üye :	Yard.Doç.Dr. Tuğba SARAÇ
	
		Enstitü Müdürü

ÖZET

ÜÇLÜ SORUMLULUK YAKLAŞIMIYLA, ALTERNATİF BAĞLANTILARI İÇEREN ARAÇ ROTALAMA MODELLERİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

İlknur TÜKENMEZ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2017

Danışman: Doç.Dr. Onur KAYA

Doğal kaynakların azalması ve küresel ısınmanın artması çevreye karşı duyarlılığı artırmıştır. Ayrıca birçok firma sosyal olarak da sorumluluk sahibi bir anlayış benimsemiştir. Bu çalışmada, üçlü sorumluluk yaklaşımı olarak adlandırılan, finansal, çevresel ve sosyal sorumluluk bileşenleri doğrultusunda bir araç rotalama problemi (ARP) üzerinde durulmaktadır. ARP konusunda literatürdeki çalışmaların tamamına yakını, iki düğüm arasında sadece bir yol olan ağ tasarımlarını ele almışlardır, fakat gerçekte, iki düğüm arasında alternatif yollar bulunabilmektedir. Bu yollar mesafe ve süre açısından birbirinden farklılık gösterebilir. Bir yolun süresi kısa fakat yüksek karbon salımlı ve maliyetli, bir diğer yolun süresi fazla fakat karbon salınımı veya maliyeti düşük olabilir. İki düğüm arasında direkt olarak birden fazla yol olması durumunda, modelin amaç fonksiyonu ve kısıtlarına göre bu yollardan en uygun olanının seçilmesi gerekmektedir. Modelin üçlü sorumluluğu birlikte gözettiği düşünüldüğünde, alternatif yolların hangisinin seçileceği de her alternatifin bu amaçlara uygunluğuna göre değişecektir. Bu çalışmada ele alınan modelin amaç fonksiyonları, finansal olarak, yakıt tüketimi maliyetinin, sürücü ücreti ve araç maliyetinin en küçüklenmesi; çevresel olarak, araçlardan çevreye yayılan salınım/CO2 değerlerinin en küçüklenmesi; sosyal olarak da araç sürücülerinin çalışma koşullarının ve çalışma saatlerinin en uygun hale getirilmesi olarak planlanmıştır. Bu amaçlara uygun olarak, araçların hangi rotaları, hangi alternatif yollar üzerinden, hangi hız seviyeleri ile takip etmelerinin en iyi olacağının bulunması amaçlanmıştır. Bu problemin çözümü için karma tam sayılı doğrusal matematiksel model önerilmiştir. Küçük ölçekli problemler için matematiksel model kullanılmış, orta ve büyük boyutlu problemler için tavlama benzetimi algoritması önerilmiştir. Yapılan detaylı sayısal çalışmalar ile farklı durumlarda ortaya çıkan en iyi sonuçlar analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Araç Rotalama, Noktalar Arası Alternatif Bağlantı, Matematiksel Programlama, Tavlama benzetimi.

ABSTRACT

VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH ALTERNATIVE LINKS FROM THE TRIPLE BOTTOM LINE ACCOUNTING PERSPECTIVE

İlknur TÜKENMEZ

Department Of Industrial Engineering

Anadolu University, Graduate School of Science, May, 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Onur KAYA

As a result of diminishing natural sources and increasing global warming, environmental considerations are attracting more attention. In addition, today many firms are adopting a socially responsible management perspective. In this study, we analyze a vehicle routing problem (VRP) from the triple bottom line accounting perspective, considering financial, environmental and social objectives. In the literature, almost all studies about VRP consider only one link between two nodes in the network. However, in real life, more than one way can exist between two nodes, which may be different in length, duration or traffic conditions. One road might be longer but require less time due to traffic or speed limitations and result in less carbon emission or cost. Another road might be shorter but require a longer time, leading to conflicting objectives in terms of financial, environmental and social considerations. In our study, we develop a model to determine which alternative link to use between two nodes, depending on the model objectives and constraints, in addition to the routing decisions between the nodes. In this study, the minimum cost routing is considered as the financial objective, minimizing the CO₂ emissions and gas usage are considered as the environmental objectives, and optimizing the driver working conditions/working hours, and minimizing the risks of accidents are considered as the social objectives. With these objective functions, we aim to determine which routes, and which alternative links should be used depending on the road properties, in addition to the speed choices at each link. We develop a mixed integer linear mathematical model for this problem and solve small sized instances using this mathematical model, for middle and large sized instances, we also propose a simulated annealing algorithm. We present the results of our detailed numerical studies and analyze the optimal solutions found under different settings. We extract the managerial implications of our results from the triple bottom line accounting perspective.

Keywords: Vehicle routing, Alternative links between nodes, Mathematical programming, Simulated annealing.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana danışmanlık ederek beni yönlendiren, bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, destek olan sayın hocam Doç. Dr. Onur KAYA'ya teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana çeşitli konularda yardımları dokunan ve bugünlere gelmemi sağlayan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca her zaman beni destekleyen, bu aşamaya gelmemi sağlayan sevgili babam Necmi TÜKENMEZ'e ve annem Cemile TÜKENMEZ'e teşekkür eder ve minnettarlığımı sunarım.

Son olarak dostlukları için Elif Meryem GÜNDÜZ'e ve Kübra HEKİM'e, üniversite hayatım boyunca her zaman iyi birer arkadaş olan Ozan BAHADIR'a, Zühre GÜLBAHAR'a ve burada adlarını ekleyemediğim tüm arkadaşlarıma hayatıma renk kattıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı destekleyen Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri(BAP) koordinatörlüğüne şükranlarımı sunarım.

İlknur TÜKENMEZ

ESKİŞEHİR-2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

.....

İlknur TÜKENMEZ

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Araç Rotalama Problemi	10
2.1.1. Araç rotalama probleminin türleri.....	10
3. ÜÇLÜ SORUMLULUK YAKLAŞIMIYLA, ALTERNATİF BAĞLANTILARI İÇEREN ARAÇ ROTALAMA MODELLERİ.....	13
3.1. Problem Tanıtımı.....	13
4. MATEMATİKSEL MODEL SONUÇLARI.....	21
4.1. 3 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar	21
4.2. 10 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar	24
4.3. 15 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar	27
4.4. 20 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar	29
4.5. 50 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar	32
4.6. 100 Nokta İçin Kullanılan Senaryo	34
5. ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL	36
5.1. Model A.....	37
5.2. Model B.....	38
6. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	40
6.1. Sezgisel Yöntem Sonuçları.....	43
6.1.2. 20 nokta sonuçları	44

6.1.2. 50 nokta sonuçları	45
6.1.3. 100 nokta sonuçları	46
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
KAYNAKÇA.....	49
EKLER	53
ÖZGEÇMİŞ	55

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Yeşil araç rotalama probleminde kullanılan parametreler	17
Tablo 3.3. Gezgin satıcı problemi için şehir sayısına göre çözüm uzayının büyüklüğü	19
Tablo 3.2. Boyut analizi	20
Tablo 4.1. 3 nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri	22
Tablo 4.2. 3 nokta için seçilen yol ve hız seviyeleri	23
Tablo 4.3. 3 nokta için elde edilen sonuçlar.....	23
Tablo 4.4. 10 nokta için senaryo b zaman penceresi.....	25
Tablo 4.5. 10 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri.....	25
Tablo 4.6. 10 nokta için elde edilen sonuçlar.....	26
Tablo 4.7. 15 nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri	28
Tablo 4.8. 15 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri.....	28
Tablo 4.9. 15 nokta için elde edilen sonuçlar.....	29
Tablo 4.10. 20 nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri	30
Tablo 4.11. 20 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri.....	30
Tablo 4.12. 20 nokta için elde edilen sonuçlar.....	32
Tablo 4.13. 50 nokta için elde edilen sonuçlar.....	33
Tablo 4.14. 100 nokta için elde edilen sonuç.....	35
Tablo 6.1. Senaryo a-20 nokta sonuçları.....	44
Tablo 6.2. Senaryo b-20 nokta sonuçları	44
Tablo 6.3. Senaryo c-20 nokta sonuçları.....	44
Tablo 6.4. Senaryo a-50 nokta sonuçları.....	45
Tablo 6.5. Senaryo b-50 nokta sonuçları	45
Tablo 6.6. Senaryo c-50 nokta sonuçları.....	45
Tablo 6.7. Senaryo a-100 nokta sonuçları.....	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Araç rotalama problemi çeşitleri	12
Şekil 3.1. Yakıt tüketimi-hız ilişkisi	16
Şekil 4.1. 3 nokta için uzaklık ve hız değerleri	21
Şekil 5.1. Model A f_e değeri=0,00034	37
Şekil 5.2. Model A f_e değeri=0,00017	38
Şekil 5.3. Model B	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ALNS	: Uyarlanabilir Komşu Arama Sezgiseli
ARP	: Araç Rotalama Problemi
B&C	: Dal-Kesme Algoritması
TB	: Tavlama Benzetimi
Y-ARP	: Yeşil Araç Rotalama Problemi
ZP	: Zaman Penceresi
ZB-ARP	: Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi
ZP-ARP	: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

1. GİRİŞ

Araç Rotalama Problemi (ARP), bir merkezi depoda yerleşmiş bulunan ve her biri aynı veya farklı kapasitelere sahip olan araçlar filosunun, her biri farklı bir yerleşime ve bilinen talebe sahip olan bir müşteriler kümesine amaç fonksiyonu değerini en iyileyecek şekilde hizmet sunarak depoya geri dönmesi için gerekli rotaların belirlenmesi problemidir. (Çetin ve Gencer, 2010)

ARP üzerinde ilk olarak Dantzig ve Ramser (1959) tarafından çalışılmıştır. Clarke ve Wright (1964) Dantzig ve Ramser'in metodunu geliştirmiştir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre araç rotalama probleminin birçok çeşidi vardır. Kapasiteli, Zaman Bağımlı, Zaman Pencereli, Topla- Dağıt, Çok Depolu, Tek Depolu, Rassal, Periyodik, Dinamik, Stok Rotalama, Karma Araç Filolu, Şehir, Bulanık, Açık, Çok Aşamalı, Üretim ve Yeşil, araç rotalama problemi çeşitlerinden bazılarıdır. Akademik anlamda bir adım ileriye gitmek için ve gerçek hayata daha yakın problemleri ele almak amacıyla geliştirilen ARP'ni artık tek bir sınıfa dahil etmek günümüzde pek de mümkün olmamaktadır. Yapılan çalışmalarda birçok çeşit birleştirilmiştir.

Doğal kaynakların sınırlı olması, küresel ısınmanın artması ve artan rekabet insanları doğal kaynakları kullanmada daha duyarlı hale getirmiştir. Ülke yönetimleri, belediyeler, okullar, Sivil Toplum Kuruluşları kişileri bu konuda bilinçlendirmek adına çalışmalar yapmaktadır. Akademik çalışmalara bakıldığında da bu konuda yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Lojistik sektörü de bu konuya önem vermektedir ve yeşil lojistik tanımı doğmuştur. Yeşil lojistik, tedarik zincirinin her aşamasında daha az yakıt tüketmeyi, zehirli gazların salınımını azaltmayı amaçlamaktadır. Araç rotalama konusu da yakıt tüketimi ile doğrudan ilgili olduğundan dolayı bu konuda çalışmalar yapılmaktadır.

Y-ARP (Yeşil Araç Rotalama Problemi) yakıt tüketimi, zararlı gazların salınımı gibi çevresel konularla ilgilenmektedir. Yeşil araç rotalama problemlerinin amacı yakıt tüketiminin azaltılmasıdır. İlk çalışmalarda yakıt tüketiminin sadece gidilen yolun uzunluğuna bağlı olduğu düşünülmüştür. Fakat yapılan çalışmalarla yakıt tüketimini artıran tek faktör yolun uzunluğu olmadığı görülmüştür. Aracın hızı da yakıt tüketimini etkilemektedir. Hız sürekli değişken olarak alınıp yakıt tüketimine bakıldığında eğrisel bir grafik ortaya çıkar. Bektaş ve Laporte (2011, s.1235)'a göre bu grafiğin en düşük değerleri 55 km/saat hız aralığında elde edilir. Hız 55 km/saatten daha düşük bir değer

aldıkça yakıt tüketimi artar. Hız 55 km/saatin üstüne çıktığında da aynı durum geçerlidir. Yakıt tüketimini etkileyen en etkin faktörler gidilen yolun uzunluğu, aracın hızı, aracın boş ağırlığı ve taşınan yük miktarıdır. Yapılan çalışmalarda bu faktörlerin biri veya birkaçı dikkate alınarak problemler çözülmüştür.

Bu çalışmada, iki düğüm arasında alternatif direkt yolların mümkün olduğu bir ağ tasarımı içerisinde, araç rotalama problemleri, finansal, çevresel ve sosyal amaçlar beraber gözetilerek analiz edilmiştir. ARP üzerine uzun yıllardır çalışılmaktadır, fakat literatürdeki çalışmaların tamamına yakını, iki düğüm arasında sadece tek bir direkt yol olan ağ tasarımlarını ele almışlardır. Fakat gerçek hayatta iki düğüm arasında alternatif direkt yollar bulunabilmektedir ve bu yollar mesafe ve süre açısından birbirinden farklılık gösterebilir. Örneğin, şehir içinden giden bir yol, çevre yoluna göre daha kısa olabilir, fakat trafik ve hız sınırlamaları dolayısıyla daha uzun süre gerektirebilir. Benzer şekilde, bazı paralı yollar veya ücretli geçişlerin bulunduğu yollar, daha kısa veya daha hızlı olmasına rağmen, finansal açıdan daha maliyetli olabilir.

İki düğüm arasında alternatif direkt yolların varlığı, iki nokta arasında alternatif rotaların olmasından daha farklıdır. İki düğüm birbirine direkt olarak bağlı iken literatürdeki ağ gösterimlerinde genellikle tek bir dal kullanılmaktadır, fakat bu iki düğüm arasında direkt olarak birden fazla dal olması durumunda, modelin amaç fonksiyonu ve kısıtlarına göre bu dallardan en uygun olanının model tarafından seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ele alınan model üçlü sorumluluk yaklaşımıyla finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonlarını içermektedir. Modelin üçlü sorumluluğu birlikte gözetileceği düşünülürse, alternatif yolların hangisinin seçileceği de, her alternatifin bu amaçlara uygunluğuna göre değişecektir. Bu çalışmada ele alınan amaç fonksiyonları, finansal olarak, firma için en az maliyetle rotalamanın yapılması yanında; çevresel olarak, araçlardan çevreye yayılan salınım/CO₂ değerlerinin en küçüklenmesi, yakıt tüketiminin en küçüklenmesi; ve sosyal olarak da araç sürücülerinin çalışma koşullarının ve çalışma saatlerinin en uygun hale getirilmesi ile kaza risklerinin en aza indirgenmesi olarak planlanmaktadır. Bu amaçlara uygun olarak, araçların hangi rotaları, hangi alternatif yollar üzerinden, hangi saatlerde, hangi hız seviyeleri ile takip etmelerinin en iyi olacağının bulunması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmında sırasıyla literatür taraması, üçlü sorumluluk yaklaşımıyla alternatif bağlantıları içeren araç rotalama modelleri, matematiksel model

sonuçları, çok amaçlı matematiksel model, sezgisel çözüm yöntemi, sonuç ve öneriler kısmı yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Araç rotalama problemi üzerinde ilk olarak Dantzig ve Ramser (1959) tarafından 1959 yılında çalışılmıştır. Clarke ve Wright (1964) 1964 yılında Dantzig ve Ramser(1959)'ın metodunu geliştirmiştir. Araç rotalama problemlerinin amaç fonksiyonuna ve kısıtlara göre çok farklı çeşitleri bulunmaktadır. Açık uçlu, zaman pencereli, birden fazla depolu, müşteri seçimli veya periyodik araç rotalama problemleri literatürde çalışılan araç rotalama modellerinden birkaç tanesidir. Bu projede ele alınacak çevresel faktörlerin de bulunduğu araç rotalama problemleri, literatürde Y-ARP olarak ifade edilmektedir. Y-ARP'nin temeli Barth, Younglove ve Stora (2005)'nin çalışmasına dayanmaktadır. Y-ARP'nin amacı egzoz salınımının, dolayısıyla yakıt tüketimlerinin en küçüklenmesidir. Yakıt tüketimini etkileyen en etkili faktörler yolun uzunluğu, aracın hızı, aracın boş ağırlığı ve taşınan yük miktarıdır. Yapılan araştırmalar yakıt tüketiminde sadece yol uzunluğunun değil aracın hızının, taşınan yük miktarının ve aracın boş ağırlığı gibi birçok faktörün de etkisinin olduğunu göstermektedir.

Enerji kaynakları sınırlıdır ve günümüz üretim ve dağıtım stratejilerine bakıldığında doğal kaynakların sürdürülebilir yöntemlerle kullanıldığı söylenemez. Küresel ısınmanın artması, doğal kaynakların azalması ve kirliliğin artması doğal kaynakların daha dikkatli kullanılmasına verilen önemi artırmaktadır. Ülke yönetimlerinde bu konularda önlem alınmaya başlanmıştır. Bu nedenle yeşil lojistik de akademik çalışmalarda dikkat çekmeye başlanmıştır. Yakıt tüketimi, zararlı gazların salınımı üzerine birçok akademik çalışma yapılmıştır. Naderipour ve Alinaghian (2016) CO_2, NO_x , CO salınımını zaman bağımlı Açık-ARP modeli ile ölçmüşlerdir. Eguia vd. (2013) de çevresel konularda çalışmışlardır. Bu çalışmada finansal etkenlerle beraber çevresel etkenler de ortaya çıkmıştır. Sürücü ücreti, yakıt maliyet, araç maliyeti iç maliyet, zararlı gazların salınımı, gürültü kirliliği ve kazalar dış maliyet olarak ele alınmıştır. Modelde toplam mesafenin, iç maliyetin ve dış maliyetin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Matematiksel modelin ardından problem tasarruf algoritmasıyla çözülmüştür. Molina v.d. (2014) bu modeli geliştirerek ele almışlardır. Gerçek problem modellenmiştir ve sezgisel yöntem kullanılarak çözülmüştür. Bir başka açıdan çalışma da Cheng, Wang ve Zhang (2016) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada da karbon salınımıyla ilgilenilmiştir. Bu modelde karbon kapasitesi, karbon kapasitesi ve aşımında ceza maliyeti, karbon kapasitesi ve aşılmayan kapasitenin satılması ve vergi politikaları

modele eklenmiştir. Amaç toplam maliyeti en küçüklemektir. Amaç fonksiyonu stokta tutma maliyeti, taşıma maliyeti ve yakıt tüketim maliyetini içermektedir. Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) Y-ARP modelini formüle ederken yakıt çeşitleri ve yakıt istasyonları üzerinde durmuşlardır. Araçların tükettikleri yakıt miktarına göre yakıtları bitmeden nereden yakıt ikmali yapacakları modelde çalışılmıştır. Yu v.d. (2017) de Erdoğan ve Miller-Hooks (2012)'un çalışmasını geliştirmişlerdir. Modelde melez araçlar kullanılmıştır ve tavlama benzetimi ile en yakın komşu sezgisel modellenmiştir. Felipe v.d. (2014) Y-ARP modelini ele alırken elektrikli araçları ve şarj istasyonlarını da modele eklemiştir ve problemi çözmek için birkaç sezgisel yöntem kullanmıştır.

Kopfer, Schönberger ve Kopfer (2013) çalışmalarında farklı tipte araçlar kullanarak yakıt tüketiminin bundan nasıl etkilendiğini göstermişlerdir. ARP'de mesafenin en küçüklenmesi CO_2 salınımının da enküçükleneceğini düşündürür. Fakat bu her zaman böyle olmaz. Kullanılan araç tipi ve taşınan miktar da CO_2 salınımını etkiler. Aracın boş ağırlığı azaldıkça yakıt tüketimi de azalır. Koç vd. (2014) çalışmalarında üç farklı araç tipi kullanarak yakıt tüketimi ve sürücü maliyetini en küçüklemeyi amaçlamışlardır. Suzuki (2010) 3 matematiksel model kurmuş ve 5,10 ve 15 nokta için her bir model çalıştırmıştır. Modeller en kısa yol problemi, yakıt en küçükleme problemi ve yeni geliştirilen ağır yüklerin önce bırakılması, hafif yüklerin sonra teslim edilmesini amaçlayan yöntemdir. Sonuçlara bakıldığında ağır yüklerin önce hafif yüklerin sonra teslim edilmesi yakıt tüketiminde %4.9 ile %6.9 arasında bir tasarruf sağladığı görülmüştür. Teng ve Zhang (2016) da taşınan yükün yakıt tüketiminde önemli etkisinin olduğunu iki farklı modeli kıyaslayarak göstermişlerdir. Kara, Kara ve Yetiş (2007) taşınan yükü ve uzaklığı amaç fonksiyonuna ekleyerek enerji en küçüklemeyi amaçlamışlardır.

Alameen, Alijamal ve Damrah (2016), Clarke ve Wright(1964)'ın tasarruf algoritmasını geliştirerek ARP ve Gezgin satıcı probleminin çözülmesini sağlamışlardır. Fagerholt, Laporte ve Norstad (2009) üç farklı yöntemle yakıt tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. İlk modelde hız karar değişkeni olarak tanımlanmıştır. İkinci modelde dağıtım süresi değişkendir. Üçüncü model en kısa yol problemi olarak ele alınıp yakıt tüketiminin en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Fagerholt, Laporte ve Norstad (2009) üç farklı model üzerinde gemi rotalama problemini yakıt tüketimini en küçüklemeyi amaçlayarak çalışmışlardır. İlk modelde

hız, ikinci modelde rota başlangıç zamanı karar değişkeni olarak alınmıştır. Üçüncü model en kısa yol problemi olarak ele alınmıştır.

Günün her saati trafik yoğunluğu aynı olmamaktadır. Bu nedenle yolun durumuna bağlı olarak rota süresi, aracın hızı ve yakıt tüketimi değişmektedir. Maden, Eglase ve Black (2010) Lantime algoritmasını tanıtmışlardır. Bu algoritma yolun zaman tablosunu çıkartabilir ve toplam süreyi en küçükleyen araç rotalamasını yapar. Rotalama yapılırken ilk rota tabu arama kullanılarak elde edilir. Fakat dört farklı yöntem kullanılarak en iyi rota bulunmaya çalışılır. Bu yöntemler çaprazlama, çıkarma-ekleme, bir nokta değiştirme ve takas etme yöntemidir. Hız düşürüldüğünde yakıt tüketiminin arttığı gözlenmiştir. Franceschetti vd. (2013) depo ve noktalardan ayrılma süresi ve hızı zaman penceresini dikkate alarak en iyilenmeye çalışmışlardır. Amaç toplam maliyetin en küçüklenmesidir. Rotalar sabittir. Problem zaman bağımlı olarak günün farklı zaman dilimlerinde trafikte sıkışıklık olduğu için hızın çok düşük olması ve böylece sürücü ücretlerinin artışına dikkat çekmiştir. Sadece sabah saatleri sıkışık zaman olarak alınmıştır. Sıkışık zamanlardaki hız sabit 10 km/sa olarak kabul edilmiştir. Sürücülerin sıkışıklığa denk gelmemek için depoda veya noktalarda beklemelerine izin verilmiştir. Sürücülere ödenen ücretler depodan ayrılışına göre ve başlama süresine göre hesaplanmıştır. Amaç maliyeti en küçüklemek olduğu için sıkışık zamanlarda aracın depoda beklemesi ödenecek ücreti azalttığı gibi hızdan kaynaklanan yakıt tüketimini de azaltmıştır. Orta ve büyük boyuttaki ARP'ni çözmek zor ve masraflıdır. Bu nedenle bazı sezgisel yöntemler kullanılır. Franceschetti vd. (2017) ALNS sezgisel yöntemini orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanmışlardır. Sonuçlara bakıldığında sezgiselin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Orta boyuttaki kirlilik Rotalama probleminin en iyi çözümü vermesi çok zordur. Bu nedenle Demir, Bektaş ve Laporte (2012) çalışmalarında problemlerin kısa sürede çözülebilmesi için bir sezgisel geliştirilmiştir. Sezgisel iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ALNS (Uyarlanabilir komşu arama sezgiseli) meta-sezgiseline göre zaman pencereli araç rotalama problemi çözülerek rotalar belirlenir. Rotalar arası hız sabit bir değerdir. İkinci aşamada belirlenen rotalar için yakıt tüketimini ve sürücü ücretlerini en küçükleme amaçlı hız eniyileme algoritması kullanılarak her bir nokta için noktalar arası en iyi hız bulunur. İki nokta arası hız her bir nokta için farklı olabilir. Kramer vd. (2015) de hız ve rota başlama zamanı eniyileme üzerinde çalışmışlardır. Yerel arama tabanlı meta-sezgisel iyi sonuçlar elde edilmiştir. Y-ARP konusunda sezgisel yöntem

üzerine yapılan bir başka çalışma da Koç ve Karaoğlan (2016) tarafından yapılmıştır. B&C algoritmasını tavlama benzetimi yöntemiyle daha kısa sürede uygulayabilmişlerdir.

Çözülmesi uzun zaman gerektiren çok amaçlı problemlerin en iyi çözümünü bulmak mümkün değildir. Bu nedenle çok amaçlı eniyileme yöntemleri kullanılmaktadır. Demir, Bektaş ve Laporte (2014) çalışmalarında problemi iki amaçlı bir çevreci araç rotalama problemi olarak ele almışlardır. Amaçlar yakıt tüketiminin ve dağıtım süresinin en küçüklenmesidir. Çözülmesi kolay olmayan çok amaçlı problemlerde her amaç aynı anda en iyilenemeyebilir. Bunu engellemek için çok amaçlı en iyileme yöntemleri kullanılır. Bu makalede dört farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar Ağırlıklandırma yöntemi (WM), Normalleştirilmiş ağırlıklandırma yöntemi (WMN), Epsilon kısıt yöntemi (ECM) ve melez yöntem (HM). (Melez yöntem ağırlıklandırma ve epsilon kısıt yönteminin birleştirilmiş halidir.) Bektaş ve Laporte (2011)'un çalışmasında çevreci araç rotalama problemi en iyilenerek çözülememiştir. Bu nedenle sezgisel bir algoritmaya ihtiyaç duyulmuştur. Kullanılan bu metasezgisel yöntem geniş ALNS). Weare ve Savelsbergh (2016) de araç rotalama problemini iki amaçlı olarak modellemişlerdir. Amaçlar en düşük maliyet ve rota uzunlukları arasındaki dengesizliği en küçüklemektir. Kumar vd. (2016) çok amaçlı kirlilik ve üretim ARP'ni ZP (Zaman Penceresi) değerleriyle modellemişlerdir. Amaçlar operasyonel maliyeti ve yakıt tüketimini en küçüklemektir. Problemi çözmek için iki algoritma kullanmışlardır.

90'lı yılların başından itibaren büyük bir ivme kazanmış ve çözülmesi zor olan problemlerde çözümünde kullanılan meta-sezgisel yöntemler hakkında yapılan literatür taraması çalışmalarından biri Şahin ve Eroğlu (2014) tarafından yapılmıştır. Yapay Arı Kolonisi- Öztürk, Hançer ve Karaboğa (2014), Parçacık Sürü Optimizasyonu-Erdoğmuş ve Yalçın (2015), Tavlama Benzetimi, Genetik Algoritma ARP'nin çözümünde kullanılan meta-sezgisellerden bazılarıdır. Kuo (2010) zaman bağımlı ARP modeli için tavlama benzetimi sezgiselini üzerinde yakıt tüketimini en küçükleme amacıyla çalışmıştır.

Banos vd. (2013) Pareto tabanlı melez meta sezgisel yardımıyla zaman pencereli çok amaçlı ARP çözülmüştür. Amaç fonksiyonları en kısa yolu bulmak ve uzaklık ve yük dengesizliklerini azaltmaktır. Elde edilen sonuçlar değerlendirme algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır ve geliştirilen algoritmanın iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Model çalışma süresi artırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ghorbani ve Jokar (2016)

çok depolu çok ürünlü yerleşim-rotalama problemi için melez bir meta-sezgiselle tavlama benzetimi meta-sezgiselini kullanmışlardır. Sonuçlar karşılaştırıldığında melez sezgiselin tavlama benzetiminden biraz daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Banos vd. (2013) çok amaçlı ARP'ni paralel bilgisayar kullanarak tavlama benzetimi meta-sezgiseli ile çözmüştür. Amaç fonksiyonları en kısa yolu bulmak ve uzaklık ve yük dengesizliklerini azaltmaktır. Bir, iki ve dört bilgisayar paralel kullanılarak örnek problemler tavlama benzetimi meta-sezgiseli ile çözülmüştür. Jozefowicz, Semet ve Talbi (2008) çok amaçlı ARP hakkında bir literatür taraması yapmışlar ve ARP'nin amaçları, çözüm yöntemleri hakkında bilgi vermişlerdir. Ghoseiri ve Ghannadpour (2010) çok amaçlı zaman pencereli ARP'ni hedef programlama genetik algoritma yöntemiyle çözmeye çalışmışlardır. Sezgisel yöntemin etkinliği Solomon'un örnek problemi kullanılarak denenmiştir. Kaya ve Urek (2016) de çalışmalarında tavlama benzetimini kullanmışlardır.

Küçükoğlu vd. (2015) tavlama benzetimi meta-sezgiselini kullanarak Solomon'un örnek problemleri çözmüştür. Yakıt tüketimini en küçüklemeyi ve en kısa yolu bulmayı amaçlayan zaman pencereli ARP'ler çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen algoritmayla küçük ve orta boyuttaki problemler kısa sürede en iyi çözüme kabul edilebilir yakınlıkla çözülmüştür. Büyük boyuttaki problemde için de çözüm süresi ve en iyi çözüme yakınlık kabul edilebilir düzeydedir.

Araç rotalama problemlerinde genellikle bir araç tek bir sefer kullanılır. Cinar, Gakis ve Pardalos (2015) çalışmalarında bir aracın birden çok kez rotaya atanmasını denemişlerdir. Rotaların bir bitiş süresi belirlenmiştir ve model tavlama benzetimiyle çözülmüştür.

Kim v.d. (2015) çalışmalarında şehir araç rotalama problemini tanıtmışlardır. Bu konuda yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, çalışmalar sınıflandırılmış ve ileriye dönük nelerin yapılabileceği üzerinde durulmuştur.

Mousavi ve Moghaddam (2013) iki araç rotalama problemini iki aşamalı olarak çözmüşlerdir. İlk aşamada çapraz sevkiyat noktası belirlenmiş, ikinci aşamada rotalama yapılmıştır. Model GAMS paket programı ve melez sezgisel yöntem kullanılarak çözülmüştür. Melez sezgiselin daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlenmiştir. Li, Yuan ve Chang (2016) de yakıt tüketimini en küçükleyen ARP'ni iki aşamalı olarak ele almışlardır. İlk aşamada depodan merkez şehir dağıtım noktalarına, ikinci aşamada da oradan müşterilere olan rotaları yakıt tüketimini en küçükleyecek şekilde

oluşturulmasını amaçlamıştır. Kullandıkları sezgisel yöntemle ilk olarak rotaları oluşturmuşlar ardından rotaları iyileştirmişlerdir.

Klasik ARP'nin genelinde iki nokta arasında tek bir yol olduğu varsayılmaktadır. Fakat gerçek hayatta bu durum her zaman bu şekilde olmayabilir. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak iki nokta arasında sadece tek bir yol değil, alternatif birden fazla yolun olduğu ARP ele alınmıştır. Alternatif yollar, yolun uzunluğu yanında trafik durumu ve süreye göre farklılıklar gösterebilir. Örneğin, şehir içinden giden bir yol, çevre yoluna göre daha kısa olabilir, fakat trafik ve hız sınırlamaları dolayısıyla daha uzun süre gerektirebilir. Benzer şekilde, bazı paralı yollar veya ücretli geçişlerin bulunduğu yollar, daha kısa veya daha hızlı olmasına rağmen, finansal açıdan daha maliyetli olabilir. Dğümler arasında alternatif yolların var olması, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak modele ekstra bir boyut katmaktadır. Literatürdeki araç rotalama modellerinde temel olarak i noktasından j noktasına gidilip gidilmeyeceğine karar verilmesi gerekirken, bu çalışmada ele alınan modelde, i noktasından j noktasına gidip gitmeme kararı yanında, gitme durumunda hangi alternatif yoldan gidilmesi gerektiği kararının da bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı uzunluk ve farklı hız seviyeleri bulunan alternatif yollar gözetilerek, en iyi rotanın, finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonlarına göre bulunması planlanmıştır. Oluşturulan modelin, finansal, çevresel ve sosyal amaçları birlikte gözettiği düşünülürse, alternatif yolların hangisinin seçileceği de, her alternatifin bu amaçlara uygunluğuna göre değişecektir. . Bu çalışmada ele alınan modelin amaç fonksiyonları, finansal olarak, yakıt tüketimi maliyetinin, sürücü ücreti ve araç maliyetinin en küçüklenmesi; çevresel olarak, araçlardan çevreye yayılan salınım/CO2 değerlerinin en küçüklenmesi; sosyal olarak da araç sürücülerinin çalışma koşullarının ve çalışma saatlerinin en uygun hale getirilmesi olarak planlanmıştır. Bu amaçlara uygun olarak, araçların hangi rotaları, hangi alternatif yollar üzerinden, hangi hız seviyeleri ile takip etmelerinin en iyi olacağının bulunması amaçlanmıştır. Bu üç faktörün birlikte ele alınması literatürde bir yenilik olacaktır. Ayrıca bu çalışmada her müşteri noktası için ZP değerleri de modele eklenmiştir. Bu şekilde geliştirilen modelin gerçek hayat problemlerine daha da yaklaştığı söylenebilir. Küçük boyutlu problemler için karma tam sayılı doğrusal matematiksel model önerilmiş, orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için de tavlama benzetimi sezgiseli geliştirilmiştir.

2.1. Araç Rotalama Problemi

İşletmelerin toplam lojistik ve dağıtım maliyetlerinin önemli bir kısmı taşıma maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaynakların daha verimli kullanılması, maliyetlerin azaltılması, servis kalitesinin artırılması daha da önem kazanmaktadır.

Talep noktalarına hizmet vermek için aşağıdaki unsurlar dikkate alınmalıdır:

1. Tüm müşterilerin talepleri karşılanmalıdır,
2. Araç kapasitesi aşılmamalıdır,
3. Her bir araç sadece bir rota üzerinde faaliyet göstermelidir,
4. Maliyet yapılı amaç fonksiyonu en aza indirgenmelidir.

ARP'nin temel bileşenleri depo, araç, talep yapısı ve müşterilerdir. (Elbasan, 2015, s.14-15) Modellerde ele alınan amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre ARP'nin farklı türleri mevcuttur.

2.1.1. Araç rotalama probleminin türleri

Araç rotalama problemlerinde eklenen kısıt sayısının artması ve müşteri sayısının artması iyi çözüm bulmayı zorlaştırmaktadır. ARP çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılabilir. Bu ölçütler genellikle problemin bileşenleri olan kısıtların, araçların, amaç fonksiyonu türü ve sayısına bağlıdır. ARP'nin sınıflandırılmasına yönelik Koç'un (2012, s.16) hazırlamış olduğu sınıflandırma tablosu Şekil 2.1'de verilmiştir.

Kısıtlarına göre ARP çeşitleri:

Kapasite kısıtlı ARP'de her aracın belirli bir kapasitesi vardır ve her rotadaki talep noktalarının toplam talebi araç kapasitesini geçemez.

Mesafe kısıtlı ARP'de her aracın toplam gidebileceği mesafe belirlidir ve rotalara atanan araçlar o mesafeyi geçemez.

ZP-ARP (Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi)'de her talep noktasının en erken ve en geç servise başlama zamanları önceden belirlenmiştir ve o talep noktasında servise başlama zamanı belirlenen aralıkta olmalıdır.

Parça dağıtımlı ARP'de bir talep noktasının talebi birden çok araç tarafından sağlanmaktadır.

Topla-dağıt ARP’de depodan müşteri noktalarına dağıtım yapılırken müşteri noktalarından depoya da toplama yapılır. Gıda sektöründe ürünlerin dağıtımını yapılırken günü geçmiş ürünlerin toplanması topla-dağıt ARP’ye örnek olarak verilebilir.

Periyodik ARP’de belirli bir dönemin planı en başta yapılmaktadır ve müşteriler birden fazla hizmet görmektedir. Müşterilere yapılacak servis sayısı müşterilerin talep miktarlarına, stok alanlarına göre değişmektedir (Koç, 2012).

ZB-ARP (Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi)’de şehir içi taşımacılıkta gün içerisinde taşımacılık yapan araçların hızı ve buna bağlı olarak da ulaşım süreleri kullanılan yol ve yolun kullanıma başlama zamanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Çok depolu ARP’de talep noktalarının talepleri tek bir depodan karşılanmaz, birden fazla depo vardır.

Stokastik ARP’de problem elemanlarından biri ya da birkaçı rassaldır.

Yolların durumuna göre ARP çeşitleri:

Simetrik ARP’de bir noktadan diğerine olan mesafe eşittir, ($d_{ij}=d_{ji}$)

Asimetrik ARP’de i noktasından j noktasına gitmek için gerekli olan mesafe j noktasından i noktasına gitmek için gerekli olan mesafeye eşit olmayabilir, ($d_{ij}\neq d_{ji}$).

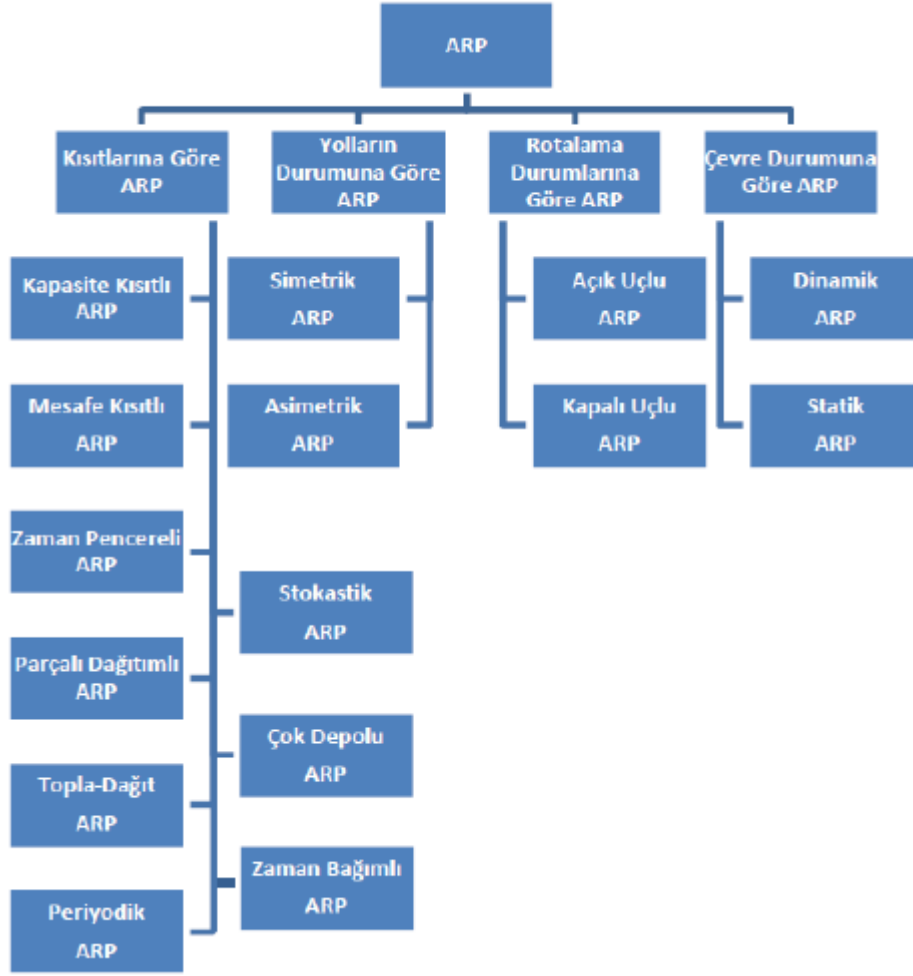
Rotalama durumlarına göre ARP çeşitleri:

Açık uçlu ARP’de depodan çıkan araçlar rotayı tamamladıklarında tekrar depoya dönmek zorunda değildirler, son müşteri noktası rotanın da bitiş noktası olur.

Çevre durumuna göre ARP çeşitleri:

“Statik ARP, rotalama süreci başlamadan önce planlanacak rotalarla ilgili tüm bilgilerin bilinmesi ve rotalar oluşturulduktan sonra rotalamaya ilişkin bilgilerin değişmemesi şartlarını içerir“(Larsen, 2001’den aktaran Koç, 2012, s.23).

Dinamik ARP’de yer alan dinamik yaklaşımı karar verici için dinamik olarak araç rotaları ve çizelgelenmesi için gerekli bilgilerin açığa çıkmasını ifade etmektedir. Bir eniyileme problemini dinamik yapan iki önemli durum vardır: problemle ilgili bilgiler zamana bağımlıdır ve çözümler mutlaka zaman ilerledikçe yeni gelen bilgilerle aynı zamanlarda bulunmalıdır. Bu ön çözümün bulanamayacağı anlamına gelmektedir (Bianchi 2000’den aktaran Koç, 2012, s.23).



Şekil 2.1. Araç rotalama problemi çeşitleri

Kaynak: Koç, 2012, s.17

3. ÜÇLÜ SORUMLULUK YAKLAŞIMIYLA, ALTERNATİF BAĞLANTILARI İÇEREN ARAÇ ROTALAMA MODELLERİ

3.1. Problem Tanıtımı

Literatürdeki araç rotalama modellerinde genelinde iki nokta arasında direkt tek bir yol olduğu varsayılmaktadır. Fakat gerçek hayatta bu durum bu şekilde olmayabilir. Örneğin şehir içinden giden bir yol çevre yoluna göre daha kısa olabilir fakat trafik ve hız sınırlamaları dolayısıyla uzun süre gerektirebilir. Benzer şekilde bazı paralı yollar veya ücretli geçişlerin olduğu yollar daha kısa veya daha hızlı olmasına rağmen finansal açıdan daha maliyetli olabilir. Yapılan literatür araştırmalarında hızın belli bir düzeyden sonra azalması ve artması yakıt tüketimini bir diğer ifadeyle CO_2 salınımını da artırmaktadır. Hızın çok yüksek olması da çok düşük olması gibi çevresel açıdan istenen bir durum değildir, fakat bazı durumlarda rota süresi de önemli olmaktadır. Müşteriler taleplerin belli süreler içerisinde teslim edilmesini istemektedirler. Böyle durumlarda müşteri memnuniyetinin sağlanamaması müşteri kaybına yol açacağı için bu durumun da maddi bir getirisi vardır. Ayrıca sürücülerin çalışma koşullarının ve çalışma saatlerinin en uygun hale getirilmesi, kaza riskinin azaltılması için de rota süresi önemlidir.

Literatürdeki araç rotalama modellerinde temel olarak i noktasından j noktasına gidilip gidilmeyeceğine karar verilmesi gerekirken, bu çalışmada ele alınan modellerde, i noktasından j noktasına gidip gitmeme kararı yanında, gitme durumunda hangi alternatif yoldan gidilmesi gerektiği kararının da bulunması gerekmektedir. Bu modelde, $x_{i,j,k}$ üçlü değişkeni, i noktasından j noktasına k yolu üzerinden gidilip gidilmediğini belirtmektedir. Modelde, her alternatif yolun, trafik yoğunluğuna ve yol durumuna göre farklı hız seviyeleri de bulunmaktadır. Bazı yollarda yol durumundan dolayı sadece düşük hızlarla gidilebilirken bazı yollarda sadece yüksek hızlar tercih edilebilir. Her yolun ve her hız seviyesinin yakıt tüketimi, rota süresi ve maliyet açısından farklı değerleri ortaya çıkmaktadır. Bazı yol ve hız seviyeleri yakıt tüketimini azaltırken süreyi artırabilmektedir. Bazı yollar için de tam tersi söz konusu olabilmektedir. Ayrıca müşteriler için zaman pencereleri de bu modelde yer almakta, müşterilerin talep ettikleri ürünlerin teslim edilmesi için en erken ve en geç zamanları bir kısıt olarak modelde bulunmaktadır. Bu kısıtlara göre model en iyi çözüm için en uygun yolu ve en uygun hız seviyesini seçebilmektedir.

Oluşturulan modelde finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları bulunmaktadır. Yakıt tüketim maliyeti, rota süresi ücreti, fazla mesai ücret ve oluşturulan her rota için ortaya çıkan sabit maliyet finansal amaç fonksiyonunda yer almaktadır. Tüketilen her litre yakıt için CO_2 salınımını ortaya çıkmaktadır. Bu faktör de çevresel amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Rota süresinin aşılması fazla mesaiyi ortaya çıkarmaktadır. Çalışanlar açısından bakıldığında bu durum istenen bir durum değildir. Ayrıca rota sürelerinin birbirinden farklı olması çalışanlar arasında sorun çıkmasına neden olabilmektedir. Rota süresinin beklenen süreyi aşmasının engellenmesi ve rota süreleri arasındaki dengesizliğin azaltılması da sosyal amaç olarak ele alınmaktadır.

Oluşturulan modelde iki nokta arasında üç farklı direkt yolun olduğu ve her yolun iki farklı hız seviyesinin olduğu varsayılmıştır. Amaç fonksiyonuna ve kısıtlara göre modelin en uygun yol ve hız seviyesini seçmesi beklenmektedir. Her müşterinin belli bir talebi vardır ve modelde aynı kapasiteye sahip araçlar kullanılmıştır. Modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

İndisler

i, j : müşteri talep noktaları indisleri

k : iki nokta arasındaki alternatif yol indisleri

n : alternatif yollar üzerindeki farklı hız indisleri

Kümeler

$N=(0, \dots, N)$ Gidilecek nokta kümesi, 0 depo

$N_0= N/\{0\}$ Müşteri kümesi

N_h = Hız seviyesi kümesi

K = Noktalar arası bağlantı kümesi

$\mathcal{A}=\{(i,j) : i,j \in N \text{ ve } i \neq j\}$ Ayrıt kümesi

Parametreler:

q_i : i . müşterinin talebi

$a(i)$: i . nokta için en erken servis başlama zamanı

$b(i)$: i . nokta için en geç servis başlama zamanı

Q : Araç kapasitesi

t_i : i . noktanın servis süresi

m : araç sayısı

M: Yeterince büyük sayı

f_d : Rota süresi beklenen rota süresini aştığında ödenecek mesai/ceza ücreti(sn)

f_s : Normal mesai ücreti

f_e : Rotalar arası süreyi dengeleme katkısı

f_a : Sosyal maliyet katkısı

f_b : CO_2 salınımı (kg/lt)

f_v : Araç maliyeti(tl)

d_{ijk} : i noktasından j noktasına k seviyesindeki uzaklık matrisi

S_{ijkn} : i noktasından j noktasına k uzaklığındaki n. hız matrisi

RT= Beklenen rota süresi

Karar Değişkenleri

f_{ijk} : i noktasıyla j noktası arasında k yolunda taşınan toplam yük

y_i : i noktasında servis başlama zamanı

s_j : j noktasının rotanın son durak noktası olduğu durumdaki rotanın toplam süresi

w_j : Rota süresinin beklenen rota süresini aştığı süre

e_{ij} : i. ve j. rota süreleri arasındaki fark

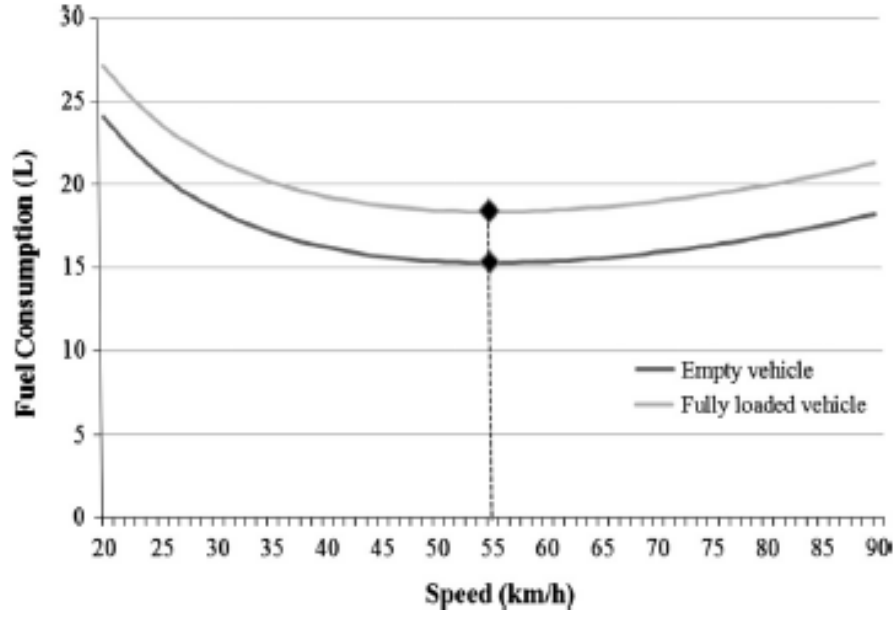
Z: amaç fonksiyonu değeri

0-1 Tam Sayı Değişkenler:

x_{ijk} : i noktasından j noktasına k. yoldan gidilirse 1, diğer durumlarda 0

v_{ijkn} : i noktasından j noktasına k. yoldan n. hızla gidilirse 1, diğer durumlarda 0

Aracın hızının ve yük miktarının diğer faktörlerin yanında yakıt tüketimini etkilediği bilinmektedir. Demir, Bektaş ve Laporte (2014) yakıt tüketimi ve hız ilişkisini yük etkisiyle beraber Şekil 3.1.'de göstermişlerdir. Bir noktadan itibaren hızın artması ve azalması yakıt tüketimini artırmaktadır. Taşınan yük miktarı arttıkça da yakıt tüketimi artmaktadır.



Şekil 3.1. Yakıt tüketimi-hız ilişkisi
Kaynak: Demir v.d, 2014, s. 468

Yeşil Araç Rotalama Problemi yakıt tüketimi modeli Demir, Bektaş ve Laporte (2014) tarafından aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$f(v) = \lambda(kNV + w\gamma\alpha v + \gamma\alpha f v + \beta\gamma v^3) \frac{d}{v} \quad (3.1)$$

Belirli bir yön için, i ile j noktaları arasındaki uzaklık d ile, hız v ile gösterilir. $\lambda = \xi / \kappa \psi$ ve $\gamma = \frac{1}{1000} n_{tf} \eta$ olarak hesaplanan sabit değerleri ifade eder, ψ ise gr/sn'den l/sn'ye dönüştürme faktörüdür. Aracın taşıdığı yük miktarı f ile gösterilmektedir. $\alpha = \tau + g\sin\theta + gC_r\cos\theta$ araç-yön sabiti, τ ivme (metre/saniye²), θ yol açısı, g yerçekimi sabiti olarak ifade edilmektedir. $\beta = 0.5 C_d\rho A$ şeklinde hesaplanır. Kullanılan diğer parametreler Tablo 3.1.'de ifade edilmiştir.

f_e değeri rota süreleri aralarındaki fark ile çarpılarak amaç fonksiyonuna eklenir.

$$f_e \leq \frac{f_s}{2(n-1)} \quad (3.2)$$

olmalıdır. Çünkü amaç fonksiyonuna rota süreleri maliyet olarak eklenir. Rota süreleri arasındaki fark 1. ve 2. rota süreleri için $|1 - 2|$ ve $|2 - 1|$ olarak hesaplandığı için iki kez maliyet fonksiyonuna eklenir. İşlemdeki 2 buradan gelmektedir. n müşterinin olduğu bir modelde n rota ihtimali olduğu için işleme n de eklenmelidir.

Tablo 3.1. Yeşil araç rotalama probleminde kullanılan parametreler

Gösterim	Tanım	Değer
w	Yüksüz Araç Ağırlığı (kg)	6350
ξ	Hava kütlesi Yakıt Oranı	1
k	Motor Sürtünme Faktörü (kilojoule/rev/litre)	0.2
N	Motor Hızı(rev/sn)	33
V	Motor Hacmi (litre)	5
g	Yerçekimi Sabiti(metre/s ²)	9,81
C _d	Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı	0,7
ρ	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	1,2041
A	Araç Ön Yüzey Alanı(m ²)	3,912
C _r	Yuvarlanma Mesafesi Katsayısı	0,01
n _{tf}	Araç Sürüş Verimi	0,4
η	Dizel Araçlar için verimlilik parametresi	0,9
f _c	Her saniye için CO ₂ ve yakıt tüketimi maliyeti(tl)	5,81
f _d	Fazla Mesai Sürücü ücreti (sn)	0,0124
f _s	Normal Mesai Sürücü ücreti(sn)	0,0062
f _a	Sosyal Amaç Katkısı	0,025
f _b	CO ₂ salınımı kg/litre	2,67
f _v	Araç Maliyeti(tl)	200
κ	Dizel Yakıtlar İçin Isıtma Değeri(kilojoule/gr)	44
ψ	Çevrim Faktörü(gr/sn'den litre/sn)	737
τ	İvme	0
θ	Yol Açısı	0

Rota süreleri arasındaki farkın maliyetteki katkısı rota süresinin katkısından büyük olursa model rota sürelerini eşitler. Fakat modelin çözümünde elde edilen rota süreleri gerçek rotaların bitiş süresi olmaz.

Çevresel ve sosyal faktörler de amaç fonksiyonuna eklendiğinde aşağıdaki gibi bir fonksiyon elde edilmektedir. Bu fonksiyondaki çevresel faktörler Demir, Bektaş ve Laporte ve (2012) makalesine benzer şekilde oluşturulmuştur.

$$\text{Yakıt Tüketimi}(FC) = (\sum_{i,j,k,n} kNV d_{ijk} \frac{v_{ijkn}}{S_{ijkn}} + \sum_{ijk} w\gamma\alpha_{ijk} d_{ijk} x_{ijk} + \sum_{i,j,k} \gamma\lambda\alpha_{ijk} d_{ijk} f_{ijk} + \sum_{ijkn} \beta\gamma\lambda d_{ijk} v_{ijkn} (S_{ijkn})^2) \quad (3.3)$$

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Enk } Z = f_c FC + \sum_j s_j f_s + \sum_j w_j f_d + f_v \sum_{j \in N_0} x_{0jk} \quad (3.4)$$

$$+ f_b FC \quad (3.5)$$

$$+\sum_j w_j f_a + \sum_{i,j} e_{ij} f_e \quad (3.6)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j,k \in N} x_{0jk} \leq m \quad (3.7)$$

$$\sum_{j,k \in N} x_{j0k} \leq m \quad (3.8)$$

$$\sum_{j,k \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N0 \quad (3.9)$$

$$\sum_{i,k \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N0 \quad (3.10)$$

$$\sum_{j,k \in N} f_{jik} - \sum_{j,k \in N} f_{ijk} = q_i \quad \forall i \in N0 \quad (3.11)$$

$$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (Q - q_i) x_{ijk} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad (3.12)$$

$$y_i - y_j + t_i + \sum_n d_{ijk} v_{ijkn} / S_{ijkn} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall (i,k) \in N, \forall j \in N0, n \in N \quad (3.13)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{n \in Nh} d_{j0k} v_{j0kn} / S_{j0kn} \leq M(1 - x_{j0k}) \quad \forall (i,k) \in N, \forall j \in N0, n \in Nh \quad (3.14)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in N0 \quad (3.15)$$

$$\sum_n v_{ijkn} = x_{ijk} \quad \forall (i,j,k) \in \mathcal{A} \quad (3.16)$$

$$f_{ijk} \geq 0 \quad \forall (i,j,k) \in \mathcal{A} \quad (3.17)$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in N0 \quad (3.18)$$

$$w_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (3.19)$$

$$y_0 \geq 0 \quad (3.20)$$

$$w_j \geq (s_j - RT) \quad \forall j \in N0 \quad (3.21)$$

$$s_i - s_j \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{j0k}) \quad \forall (i,j) \in N0 \quad (3.22)$$

$$s_j - s_i \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{i0k}) \quad \forall (i,j) \in N0 \quad (3.23)$$

Amaç fonksiyonunda (3.4) ile ifade edilen kısım finansal maliyeti göstermektedir. Tüketilen yakıt miktarının maliyeti, rota süresinin maliyeti, rotanın beklenen süreyi aştığı durumda ortaya çıkan ceza maliyeti ve kullanılan araç sayısının maliyeti finansal amacı ifade etmektedir. (3.5) ile belirtilen kısım çevresel amacı ifade etmektedir. Tüketilen yakıt miktarına göre çevreye salınan CO_2 miktarını litre cinsinden ifade

etmektedir. (3.6) ile belirtilen kısım da sosyal amacı ifade etmektedir. Rota süresinin belirlenen süreyi aşması durumunda ortaya çıkan değeri ve rota süreleri arasındaki dengesizliği ifade etmektedir.

(3.7) ve (3.8) ihtiyaç kadar aracın depodan çıkmasını ve çıkan araçların depoya geri dönmesini sağlamaktadır. (3.9) ve (3.10) bir noktaya sadece bir kez uğranmasını ve her noktaya sadece bir noktadan gelinmesini sağlamaktadır. (3.11) ve (3.12) her müşterinin talebinin karşılanmasını ve yük dengesini sağlamaktadır. (3.13) her nokta için servisin başlama zamanının hesaplanmasını sağlar. (3.14) depoya dönüldüğünde toplam rota süresinin hesaplanmasını sağlar. (3.15) her nokta için ZP değerlerinin kontrolünü sağlar. (3.16) k. Yol seviyesine bağlı n. hız seviyesinin seçilmesini sağlar. (3.17), (3.18), (3.19), (3.20) değerlerin negatif olmayan bir değer almasını sağlar. (3.21) rotanın beklenen süreyi aştığında ortaya çıkan değer hesaplanmasını sağlar. (3.22) ve (3.23) rota süreleri arasındaki farkın hesaplanmasını ve pozitif bir değer almasını sağlar.

Boyut Analizi

İki nokta arasında tek bir bağlantının olduğu problemler için çözüm uzayı $n!$ olarak bulunur. İki nokta arasında a alternatif yol varsa çözüm uzayı $n! a^n$ olur. İki nokta arasında a alternatif yol ve yollar arasında b adet hız seviyesi varsa çözüm uzayı $n! (axb)^n$ olur.

Matematiksel modelde kısıt ve değişken sayısını belirlemek için boyut analizi çalışması yapılmıştır. d müşteri sayısını m araç sayısını göstermektedir. Boyut analizi Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.3.'de şehir sayısına göre çözüm uzayının nasıl arttığı gösterilmiştir. Nokta sayısı arttıkça çözüm uzayı da genişlemektedir. Çözüm uzayı genişledikçe en iyi çözümü bulmak için geçen zaman da artmaktadır.

Tablo 3.2. *Gezgin satıcı problemi için şehir sayısına göre çözüm uzayının büyüklüğü*

Şehir sayısı	Çözüm uzayının büyüklüğü
5	120
10	3.628.800
75	$2,5 \times 10^{109}$

Kaynak: Talbi, 1965, s.7

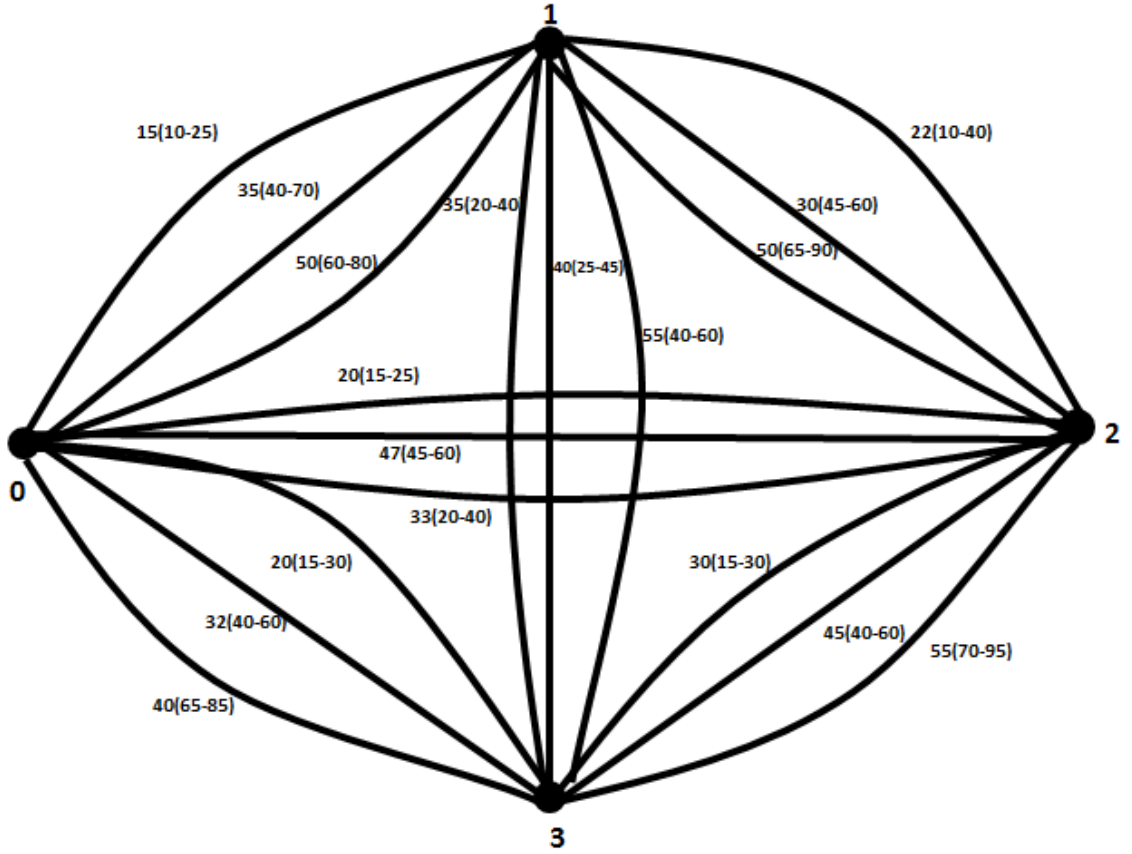
Tablo 3.3. Boyut analizi

Kısıt	Değişkenler	Değişken sayıları	Kısıt Sayıları
$\sum_{j,k \in N} x_{0jk} \leq m$	$j \in N, k \in K$	$(j+1)k$	$(d+1)k$
$\sum_{j,k \in N} x_{j0k} \leq m$	$j \in N, k \in K$	$(j+1)k$	$(d+1)k$
$\sum_{j,k \in N} x_{ijk} = 1$	$i \in N0$	i	d
$\sum_{i,k \in N} x_{ijk} = 1$	$j \in N0$	j	d
$\sum_{j,k \in N} f_{ijk} - \sum_{j,k \in N} f_{ijk} = q_i$	$i \in N0$	i	d
$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (Q - q_i) x_{ijk}$	$i, j \in N$	$(i+1)(j+1)k$	$(d+1)^2 k$
$y_i - y_j + t_i + \sum_n d_{ijk} v_{ijkn} / S_{ijkn} \leq M(1 - x_{ijk})$	$i \in N, j \in N0, k \in K, n \in Nh$	$(i+1)jkn$	$(d+1)dkn$
$y_j + t_i - s_j + \sum_n d_{j0k} v_{j0kn} / S_{j0kn} \leq M(1 - x_{j0k})$	$i \in N, j \in N0, k \in K, n \in Nh$	$(i+1)jkn$	$(d+1)dkn$
$a_i \leq y_i \leq b_i$	$i \in N0$	i	d
$\sum_n v_{ijkn} = x_{ijk}$	$i, j \in \mathcal{A}, k \in K$	$(i+1)jk$	$(d+1)dk$
$f_{ijk} \geq 0$	$i, j \in \mathcal{A}, k \in K$	$(i+1)jk$	$(d+1)dk$
$y_i \geq 0$	$i \in N0$	i	d
$w_j \geq 0$	$j \in N$	$j+1$	$d+1$
$y_0 \geq 0$	$i \in N$	$i+1$	$d+1$
$w_j \geq (s_j - RT)$	$j \in N0$	j	d
$s_i - s_j \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{j0k})$	$i, j \in N0$	ij	n^2
$s_j - s_i \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{i0k})$	$i, j \in N0$	ij	n^2

Üç nokta için boyut analizi yapıldığında toplam değişken sayısı 332, toplam kısıt sayısı 332'dir.

4. MATEMATİKSEL MODEL SONUÇLARI

Noktalar arası alternatif bağlantılar ve farklı parametrelerin etkisini görmek için örnekler üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca finansal, çevresel ve sosyal maliyet arasındaki ödünleşim de incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak üç müşteri noktası ve bir deposu olan örnek problem çözülmüştür. Farklı senaryolar ve parametrelere göre alternatif bağlantılarla modelin amaç fonksiyonunda nasıl değişiklik olduğu gözlenmiştir. Ayrıca amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim de gözlenmiştir. Ardından model büyük boyutlu problemler için de çözdürülmüştür. Tüm modellerde noktalar arasında üç yol ve her yol için iki hız seviyesi bulunmaktadır. Şekil 4.1’de 3 nokta için kullanılan noktalar arası alternatif yollar ve hız seviyeleri verilmiştir. Noktalar arasındaki ilk parametre yol uzunluğunu (km), parantez içindeki parametreler de hız seviyelerini (km/sa) göstermektedir.



Şekil 4.1. 3 nokta için uzaklık ve hız değerleri

4.1. 3 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar

Her senaryoda müşteri noktalarının talepleri: 1-200, 2-400, 3-300 kg'dır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmektedir. Toplam uzunluk kilometre (km), toplam

rota süresi ve rota süresini aşan süre saat (sa), yakıt tüketimi litre (l), maliyetler de Türk lirası (tl) cinsinden verilmiştir.

Senaryo a: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmıştır. Her nokta için en erken servis başlama zamanı 0, en geç servis başlama zamanı 10 olarak verilmiştir. Bu durum için seçilen yol ve hız seviyeleri Tablo 4.2.' de gösterilmiştir.

Senaryo b: Her nokta için aşağıdaki zaman penceresi değerleri uygulanmıştır. Zaman penceresi değerleri sıkılaştırıldığında seçilen yol ve hız seviyeleri değişmiştir. Daha uzun yollar seçilmiş ve daha kısa sürede rota tamamlanmıştır. Fakat 3. noktadan depoya dönerken bir zaman kısıtı olmadığı için bu noktalar arası yol ve hız seviyesi değişmemiştir.

Tablo 4.1. 3 Nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri

	a(i)(sa)	b(i)(sa)
1	0	0,6
2	0	1,6
3	0	2,5

Senaryo c: Her nokta için senaryo b'deki zaman penceresi değerleri uygulanmıştır ve rota süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Senaryo b ile kıyasladığımızda rota süresinin artması maliyeti artıracığından 3.nokta ile depo arasındaki yol ve hız süreyi azaltacak şekilde seçilmiştir. En hızlı yol seçilmemiştir çünkü maliyeti çok daha fazla artıracaktır.

Senaryo d: Senaryo c'deki veriler kullanılmıştır ve f_a iki katına çıkarılmıştır. Bu durumda rota süresinin artması sosyal maliyeti daha artıracığından model rota süresini kısaltacağı yol ve hız seviyesini seçmiştir.

Senaryo e: Her nokta için senaryo b'deki zaman penceresi değerleri uygulanmıştır, rota süresi 2 saat olarak belirlenmiş ve fazla mesai ücreti (f_a) on katına çıkarılmıştır. Bu durumda rota süresinin aşılması maliyeti çok fazla artıracığından dolayı model üç rota oluşturmuştur.

Senaryo f: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmış, rota süresi üç saat olarak belirlenmiştir. Bu durumda model rota süresini azaltmıştır fakat her bağlantı için hızlı yolları seçmemiştir.

Senaryo g: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmış, rota süresi 3 saat olarak belirlenmiştir ve f_a iki katına çıkarılmıştır. Bu durumda rota süresinin

aşılması maliyeti daha da artıracığı için noktalar arası daha hızlı gidilecek yollar seçilmiştir. En hızlı yollar maliyetleri çok daha fazla artıracığından seçilmemiştir.

Tablo 4.2. 3 nokta için seçilen yol ve hız seviyeleri

a		b	
c		d	
e			
g		h	

Senaryo h: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmış ve 1 ile 2. Nokta arasındaki hız seviyeleri 1/10 ile çarpılmıştır. Bu durumda 1 ve 2.nokta arasındaki yolları seçmek süreyi ve maliyeti çok fazla artıracığı için farklı bir rota

seçilmiştir. Beklenen rota süresi 9 saat olarak belirlenmiştir. Rota süresi aşılmadığı için hızlı yollar tercih edilmemiştir. Sonuç olarak, en iyi rotanın problem parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir. Rota değişmese bile bağlantılar, dolayısıyla maliyet değişmiştir.

Tablo 4.3. 3 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)
a	87	1=3,89	1=0	16,472	0	382,700	43,979	426,679
b	130	1=3,48	1=0	21,316	0	401,660	56,914	458,573
c	142	1=3,35	1=1,35	22,458	121,420	465,458	59,963	646,840
d	152	1=3,17	1=1,17	25,832	211,163	473,277	68,972	753,412
e	130	1=1,47 2=1,98 3=1,71	1=0 2=0 3=0	24,772	11,481	858,865	66,142	936,488
f	114	1=3,5	1=0,5	18,905	45,309	410,508	50,477	506,293
g	152	1=3,17	1=0,17	25,822	31,163	428,579	68,945	528,687
h	100	1=4,37	1=0	19,064	0	408,286	50,901	459,186

4.2. 10 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar

Her senaryo için müşteri noktalarının talepleri: 1-450, 2-650, 3-800, 4-550, 5-700, 6-550, 7-500, 8-650, 9-850, 10-900 kg'dır.

Senaryo a: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmıştır. Her nokta için en erken servis başlama zamanı 0, en geç servis başlama zamanı 10 olarak verilmiştir. Modelin en iyi çözümüne 3.19 saatte ulaşılmıştır.

Senaryo b: Her nokta için orta sıklıkta zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri aşağıdaki tabloda saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin çözümüne 55 sn'de ulaşılmıştır. ZP değerleri esnek olmadığı için toplam mesafe, yakıt tüketimi, toplam rota süresi ve toplam maliyet artmıştır; rota süreleri arasındaki dengesizlik azaldığı için sosyal maliyet Senaryo a'ya göre azalmıştır.

Tablo 4.4. 10 nokta için senaryo b zaman penceresi

	a(i)	b(i)
1	0	3
2	1,5	5
3	2	5
4	3	7
5	4	8
6	2	6
7	5	9
8	4	8
9	6	10
10	1	5

Senaryo c: Her nokta için sıkı zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri aşağıdaki tabloda saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin çözümüne 11sn'de ulaşılmıştır. ZP değerleri sıkı olduğu için toplam mesafe, yakıt tüketimi, rota süreleri, toplam maliyet artmış; rota süreleri arasındaki dengesizlik azaldığı için sosyal maliyet azalmıştır.

Tablo 4.5.10 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri

	a(i)	b(i)
1	0	2
2	4	6
3	5	7
4	1	3
5	6	8
6	2	4
7	0	1,5
8	3	5
9	7	9
10	5	8

Senaryo d: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmıştır ve beklenen rota süresi 8 saat olarak değiştirilmiştir. Modelin çözümüne 1 dk'da ulaşılmıştır. Beklenen rota süresi azaltıldığı için model daha kısa sürede rotalarını tamamlamıştır. Bu durumda rota süreleri ve sosyal maliyet azalmış; toplam mesafe, yakıt tüketimi ve toplam maliyet artmıştır.

Senaryo e: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmıştır ve beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiştir. Modelin çözümüne 6 dk'da ulaşılmıştır. Senaryo b ile kıyaslandığında toplam mesafe ve toplam rota süresi azalmış; yakıt tüketimi, sosyal maliyet ve toplam maliyet artmıştır.

Senaryo f: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmış, beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiş ve rota dengeleme katkısı (f_e) yarıya indirilmiştir. Modelin çözümüne 1 dk'da ulaşılmıştır. Senaryo e ile kıyaslandığında rota dengeleme katkısı yarıya indirildiği için sosyal maliyet azalmış, önemli bir değişiklik olmamıştır.

Senaryo g: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmış, beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiş ve sosyal katkı maliyeti (f_a) 2 katına çıkarılmıştır. Modelin çözümüne 1 dk'da ulaşılmıştır. Sosyal maliyet artmış, bunun dışında rota süresi, yakıt maliyeti gibi etkenler bu durumdan etkilenmemiştir.

Tablo 4.6. 10 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (l)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet (tl)	Model Çözülme Süresi (dk)
a	366,866	1=8,1 2=2,81	1=0 2=0	62,896	12,920	1008,802	167,931	1189,653	191,4
b	419,958	1=6,9 2=8,2	1=0 2=0	70,786	3,083	1149,131	188,997	1341,212	0,91
c	465,277	1=7,9 2=8,8	1=0 2=0	80,655	2,288	1241,202	215,349	1458,839	0,183
d	433,020	1=6,9 2=7,8	1=0 2=0	73,841	2,142	1158,301	197,156	1357,599	1
e	420,729	1=8,49 2=6,05	1= 2,49 2= 0,05	73,447	235,140	1265,042	196,102	1696,284	6
f	420,729	1=8,49 2=6,05	1= 2,49 2= 0,05	73,447	232,138	1265,042	196,102	1693,282	1
g	420,729	1=8,49 2=6,05	1= 2,49 2= 0,05	73,447	464,276	1265,042	196,102	1925,420	1
h	540,232	1=6,05 2=7,74	1=0,05 2=1,74	96,640	165,072	1912,918	258,028	2336,018	3,34
k	544,574	1=6,12 2=7,65	1=0,12 2=1,65	98,012	162,571	2219,234	261,691	2643,496	11

Senaryo h: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmış, beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiş ve fazla mesai ücreti (f_d) 0,1 değerini almıştır. Modelin çözümüne 3.34 dk'da ulaşılmıştır. Fazla mesai ücretinin artması maliyet artırdığı için model daha kısa sürede rotayı tamamlamaya çalışmıştır. Toplam mesafe, yakıt tüketimi ve maliyet artmıştır; rota süreleri arasındaki dengesizlik azaldığı için sosyal maliyet azalmıştır.

Senaryo k: Senaryo b'deki zaman penceresi değerleri kullanılmış, beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiş, fazla mesai ücreti (f_d) 0,1 değerini almıştır, normal mesai ücreti (f_s) 2 katına çıkarılmıştır. Modelin çözümüne 11 dk'da ulaşılmıştır. Senaryo h ile kıyaslandığında sosyal maliyet ve toplam rota süresi azalmış; toplam mesafe, yakıt tüketimi ve toplam maliyet artmıştır.

4.3. 15 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar

Her senaryo için müşteri noktalarının talepleri: 1-450, 2-500, 3-450, 4-550, 5-875, 6-600, 7-850, 8-750, 9-375, 10-750, 11-875, 12-950, 13-750, 14-650, 15-875 kg'dır.

Senaryo a: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmıştır. Her nokta için en erken servis başlama zamanı 0, en geç servis başlama zamanı 10 olarak verilmiştir. Model 6 saat çalıştırılmıştır ve en iyi çözüme yakınlığı %7,25'tir.

Senaryo b: Her nokta için orta sıklıkta zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri Tablo 4.7'de saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin çözülme süresi 46,4 dk'dır. Senaryo a ile kıyaslandığında ZP değerlerinin sağlanması için toplam mesafenin, rota sürelerinin, yakıt tüketiminin ve toplam maliyetin arttığı görülmüştür.

Senaryo c: Her nokta için sıkı zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri Tablo 4.8'de saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin çözülme süresi 2,14 dk'dır. ZP değerlerinin sağlanması için toplam mesafenin, rota sürelerinin, yakıt tüketiminin ve toplam maliyetin arttığı görülmüştür.

Senaryo d: orta sıklıktaki ZP değerleri kullanılmış ve beklenen rota süresi 6 saat olarak değiştirilmiştir. Senaryo b ile kıyaslandığında model 6 saat çalıştığı halde en iyi çözüme ulaşamamıştır. En iyi çözüme yakınlığı %17,7'dir.

Senaryo e: Sıkı ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti 2 katına çıkarılmıştır. Yakıt tüketimi biraz daha azalmıştır. Modelin çözülme süresi 1,46 dk'dır.

Senaryo f: Sıkı ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti yarıya düşürülmüştür. Yakıt tüketiminde bir azalma gözlenmemiştir. Modelin çözülme süresi 1,52 dk'dır.

Senaryo g: Sıkı ZP değerleri kullanılmış ve araç kapasitesi yarıya düşürülmüştür. Rota sayısının ve maliyetin arttığı görülmüştür. Modelin çözülme süresi 13,13 dk'dır.

Tablo 4.7.15 nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri

	a(i)	b(i)
1	0	4
2	2	6
3	6	10
4	3	7
5	2	6
6	5	9
7	2	6
8	0	4
9	3	7
10	1	5
11	5	9
12	1	5
13	4	8
14	6	10
15	2	6

Tablo 4.8. 15 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri

	a(i)	b(i)
1	0	3
2	2	4
3	7	9
4	3	5
5	4	6
6	6	9
7	4	6
8	0	2
9	4	7
10	2	4
11	5	8
12	1	3
13	4	7
14	7	10
15	4	6

Tablo 4.9. 15 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre(sa)	Yakıt Tüketimi (l)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)
a	201,845	1=4,94 2=4,46	1=0 2=0	37,661	0,773	828,602	100,555	929,930
b	280,162	1=6,18 2=7,47	1=0 2=0	53,416	2,045	1015,103	1426,22	1159,770
c	382,502	1=8,6 2=5,23	1=0 2=0	69,919	5,371	1114,937	186,683	1306,990
d	287,071	1=5,99 2=7,47	1=0 2=1,47	54,993	134,607	1085,667	146,831	1367,105
e	377,730	1=8,71 2=5,22	1=0 2=0	69,676	5,545	1520,782	186,036	1712,363
f	382,502	1=8,6 2=5,23	1=0 2=0	69,919	5,371	911,823	186,683	1103,877
g	438,323	1=4,89 2=6,96 3=8,59 4=5,24	1=0 2=0 3=0 4=0	77,155	20,419	1821,930	206,005	2048,354

4.4. 20 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar

Her senaryo için müşteri noktalarının talepleri: 1-450, 2-500, 3-875, 4-650, 5-950, 6-450, 7-500, 8-450, 9-750, 10-375, 11-650, 12-950, 13-650, 14-475, 15-350, 16-600, 17-550, 18-700, 19-650, 20-750 kg'dır. Her senaryo için model 6 saat çalıştırılmıştır.

Senaryo a: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri uygulanmıştır. Her nokta için en erken servis başlama zamanı 0, en geç servis başlama zamanı 10 olarak verilmiştir. Modelin en iyi çözüme yakınlığı kabul edilebilir seviyede değildir.

Senaryo b: Her nokta için orta sıklıkta zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri Tablo 4.10'da saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin en iyi çözüme yakınlığı kabul edilebilir düzeyde değildir fakat senaryo a ile kıyasladığımızda daha yakın bir sonuç elde edilmiştir.

Senaryo c: Her nokta için sıkı zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri Tablo 4.11'de saat cinsinden belirtilmiştir. Modelin en iyi çözüme

yakınlığı kabul edilebilir düzeyde değildir fakat senaryo b ile kıyasladığımızda daha yakın bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 4.10. 20 nokta için senaryo b zaman penceresi değerleri

	a(i)	b(i)
1	0	4
2	2	6
3	6	10
4	3	7
5	2	6
6	5	9
7	2	6
8	0	4
9	3	7
10	1	5
11	5	9
12	1	5
13	4	8
14	6	10
15	2	6
16	4	8
17	6	10
18	1	5
19	3	7
20	1	5

Senaryo d: senaryo b'deki ZP değerleri kullanılmış ve beklenen rota süresi 8 saat olarak değiştirilmiştir. Senaryo b ile kıyaslandığında en iyi çözüme olan yakınlık artmıştır.

Senaryo e: senaryo c'deki ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti 2 katına çıkarılmıştır. Model bu durumda en iyi çözüme 5.09 saatte ulaşabilmiştir. Çözülme süresi ve yakıt maliyeti dışında bir şey değişmemiştir.

Senaryo f: senaryo c'deki ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti yarıya düşürülmüştür. Rota uzunluğunun biraz azaldığı ve bulunan çözümün en iyi çözüme daha yakın olduğu gözlenmiştir.

Senaryo g: senaryo c'deki ZP değerleri kullanılmış ve araç kapasitesi yarıya dūřürölmüřtür. Modelin 6 saat çalışma sonunda en iyi özöme yakınlığı senaryo c'ye göre artmış ve rota sayısı ve diğer maliyetlerinde buna bağlı olarak arttığı görölmüştür.

Tablo 4.11. 20 nokta için senaryo c zaman penceresi değerleri

	a(i)	b(i)
1	0	3
2	2	4
3	7	9
4	3	5
5	4	6
6	6	9
7	4	6
8	0	2
9	4	7
10	2	4
11	5	8
12	1	3
13	4	7
14	7	10
15	4	6
16	5	7
17	7	10
18	1	3
19	4	6
20	2	5

Tablo 4.12. 20 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (l)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)	En iyi çözüme yakınlık
a	620,939	1=8,93 2=5,53 3=4,09	1=0 2=0 3=0	108,542	11,340	1644,681	289,808	1945,828	% 17,55
b	692,740	1=7,79 2=8,22 3=7,91	1=0 2=0 3=0	118,608	0,994	1823,129	316,684	2140,807	% 12,8
c	761,121	1=8,93 2=6,04 3=8,99	1=0 2=0 3=0	135,086	6,936	1919,891	360,680	2287,506	% 7,36
d	745,008	1=7,93 2=6,65 3=7,97	1=0 2=0 3=0	128,501	3,094	1850,043	343,097	2196,233	% 15,50
e	761,121	1=8,93 2=6,04 3=8,9	1=0 2=0 3=0	135,086	6,936	2704,74	360,680	3072,356	0
f	761,273	1=8,93 2=6,04 3=8,88	1=0 2=0 3=0	135,845	6,785	1527,079	362,705	1896,569	% 4,05
g	981,369	1=8,27 2=4,89 3=5,88 4=8,88 5=8,59	1=0 2=0 3=0 4=0 5=0	164,967	25,070	2773,746	440,462	3239,278	% 10,1

4.5. 50 Nokta İçin Kullanılan Senaryolar

Her senaryo için müşteri noktalarının talepleri: 1-350, 2-450, 3-500, 4-900, 5-850, 6-650, 7-750, 8-500, 9-275, 10-450, 11-325, 12-650, 13-700, 14-500, 15-450, 16-250, 17-400, 18-600, 19-750, 20-450, 21-800, 22-650, 23-700, 24-500, 25-250, 26-350, 27-550, 28-650, 29-750, 30-350, 31-400, 32-800, 33-700, 34-650, 35-400, 36-350, 37-600, 38-600, 39-750, 40-850, 41-650, 42-500, 43-375, 44-600, 45-800, 46-550, 47-650, 48-350, 49-450, 50-500 kg'dır. Her senaryo için model 6 saat çalıştırılmıştır.

Senaryo a: Her nokta için esnek zaman penceresi değerleri verilmiştir. Her nokta için erken en servis başlama zamanı 0, en geç servis başlama zamanı 10 olarak verilmiştir.

Senaryo b: Her nokta için orta sıklıkta zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri Ek-1’de verilmiştir. ZP değerleri saat cinsinden belirtilmiştir.

Senaryo c: Her nokta için sıkı zaman penceresi değerleri verilmiştir. Zaman penceresi değerleri EK-2’de verilmiştir. ZP değerleri saat cinsinden belirtilmiştir.

Senaryo d: Senaryo c’deki ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti 2 katına çıkarılmıştır. Modelin 6 saat sonunda en iyi çözüme yakınlığı azalmış, rota uzunluğu, toplam rota süresi ve maliyetin arttığı görülmüştür.

Senaryo e: Senaryo c’deki ZP değerleri kullanılmış ve yakıt maliyeti yarıya düşürülmüştür. Modelin en iyi çözüme yakınlığının arttığı görülmüştür. Senaryo c ile kıyaslandığında yakıt tüketiminin biraz daha azaldığı görülmüştür.

Senaryo f: Senaryo c’deki ZP değerleri kullanılmış ve araç kapasitesi yarıya düşürülmüştür. Rota uzunluğu, yakıt tüketimi ve maliyetlerin arttığı görülmüştür.

Tablo 4.13. 50 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)	En iyi çözüme yakınlık
a	1083,252	1=3,54 2=6,01 3=6,02 4=6,2 5=8,6 6=7,9	1=0 2=0 3=0 4=0 5=0 6=0	189,706	14,084	3154,519	506,516	3675,119	%31,07
b	1241,165	1=8,83 2=8,83 3=8,9 4=8,9 5=8,47 6=6,36	1=0 2=0 3=0 4=0 5=0 6=0	217,073	6,415	3584,040	579,585	4170,040	%38,21
c	1393,234	1=8,67 2=9,4 3=9,67	1=0 2=0,4 3=0,67	253,466	103,226	3938,897	676,755	4718,311	%32,38

Tablo 4.14. (Devam) 50 nokta için elde edilen sonuçlar

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)	En iyi çözüme yakınlık
		4=8,71 5=8,99 6=9,04	4=0 5=0 6=0,04						
d	1342,434	1=8,67 2=11,04 3=8,86 4=8,06 5=9,03 6=7,27	1=0 2=2,04 3=0 4=0 5=0 6=0	241,323	197,122	5278,985	644,333	6120,440	%28,24
e	1397,793	1=8,88 2=9,86 3=8,3 4=9,46 5=8,71 6=8,99	1=0 2=0,86 3=0 4=0,46 5=0 6=0	251,519	124,883	3200,84	671,556	3997,279	%35,82
f	1901,119	1=7,62 2=8,55 3=9,39 4=3,07 5=6,55 6=9,46 7=6,86 8=8,71 9=8,32 10=8,96 11=6,18	1=0 2=0 3=0,39 4=0 5=0 6=0,46 7=0 8=0 9=0 10=0 11=0	325,473	128,815	5998,089	869,013	6995,917	%23, 28

4.6. 100 Nokta İçin Kullanılan Senaryo

Senaryo a:100 nokta örneği için esnek ZP değerleri kullanılmıştır. Her müşteri noktasının talepleri: 1-450, 2-500, 3-650, 4-750, 5-800, 6-500, 7-550, 8-350, 9-950, 10-650, 11-700, 12-400, 13-350, 14-450, 15-500, 16-600, 17-750, 18-850, 19-500, 20-450, 21-500, 22-650, 23-750, 24-800, 25-500, 26-550, 27-350, 28-950, 29-650, 30-700, 31-350, 32-450, 33-500, 34-450, 35-300, 36-600, 37-450, 38-500, 39-650, 40-750, 41-800, 42-500, 43-550, 44-350, 45-950, 46-650, 47-700, 48-650, 49-350, 50-450, 51-500, 52-

450, 53-500, 54-650, 55-750, 56-800, 57-500, 58-550, 59-350, 60-950, 61-650, 62-700, 63-350, 64-450, 65-500, 66-500, 67-650, 68-750, 69-800, 70-500, 71-550, 72-350, 73-950, 74-650, 75-700, 76-500, 77-750, 78-650, 79-700, 80-450, 81-500, 82-650, 83-750, 84-800, 85-500, 86-550, 87-350, 88-950, 89-650, 90-700, 91-600, 92-450, 93-500, 94-650, 95-750, 96-800, 97-500, 98-550, 99-350, 100-950 kg'dır.

Tablo 4.15. 100 nokta için elde edilen sonuç

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Toplam Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre(sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)	En iyi çözüme yakınlık
a	2250,9	1=6,45 2=4,98 3=5,88 4=7,33 5=6,44 6=6,31 7=7,08 8=6,68 9=3,69 10=7,11 11=6,28 12=7,28 13=4,81	1=0 2=0 3=0 4=0 5=0 6=0 7=0 8=0 9=0 10=0 11=0 12=0 13=0	406,16	21,08	6754,07	1084,45	7859,61	%39,41

5. ÇOK AMAÇLI MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada ele alınan modelde finansal, çevresel ve sosyal amaçlar yer almaktadır. Bir amaç en iyilenirken diğer amaç veya amaçlar göz ardı edildiği için oldukça kötü sonuçlar elde edilebilmektedir. Sonuç olarak tüm amaç fonksiyonlarının aldığı değerlerin toplamına bakıldığında bir amacın en iyilenmesi toplamda çok kötü sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir. Amaç fonksiyonları arasında ödünleşimin dengeli olması gerekmektedir.

Finansal, çevresel ve sosyal maliyet faktörleri arasındaki ödünleşimi çözümlemek için çok amaçlı model ε -kısıt yaklaşımıyla modellenmiştir. İki farklı model oluşturularak amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim gözlenmiştir. ε -kısıt yöntemi aşağıda ifade edildiği gibidir:

$$\text{Enb. } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\}$$

Kısıtlar altında: $x \in S$

$f_i(x)$ i. Amaç fonksiyonu, p amaç fonksiyonu sayısı, S çözüm uzayı, x karar vektörü, n karar değişkeni sayısı ve $x_j \in Z, j \in 1, 2, \dots, n$. ε -kısıt yöntemi ile amaçlardan biri amaç fonksiyonunda en iyilenir, diğer amaç fonksiyonları temel gereklilikleri sağlayacak şekilde kısıtlara eklenir. Model aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\text{Enb } f_p(x)$$

Kısıtlar altında

$$f_1(x) \geq e_1,$$

$$f_2(x) \geq e_2,$$

.

.

.

$$f_{p-1}(x) \geq e_{p-1},$$

$x \in S$

Yukarıdaki modelde $e_1, e_2, \dots, e_{p-1}, f_1, f_2, \dots, f_{p-1}$ amaç fonksiyonlarının en küçük gerekliliklerini belirtir.

Bu çalışma için, finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonlarının ödünleşimini çözümlenmiştir. Bu amaçla model, Model A ve Model B olarak 2 modele dönüştürülmüştür. Çevresel ve sosyal maliyetler kısıtlara eklenerek iki modelde de

amaç fonksiyonundaki değişim gözlenmiştir. 10 noktalık örnek problem için model farklı f_e değerleri kullanılarak çok amaçlı hale getirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Model A ve Model B için çizilen grafikler aşağıda verilmiştir.

5.1. Model A

Bu modelde finansal ve çevresel maliyetler amaç fonksiyonunda yer alırken sosyal maliyet kısıtlara eklenmiştir. Böylelikle sosyal maliyetle diğer maliyetler arasındaki ödünleşim çözümlenmiştir. Model aşağıdaki gibidir:

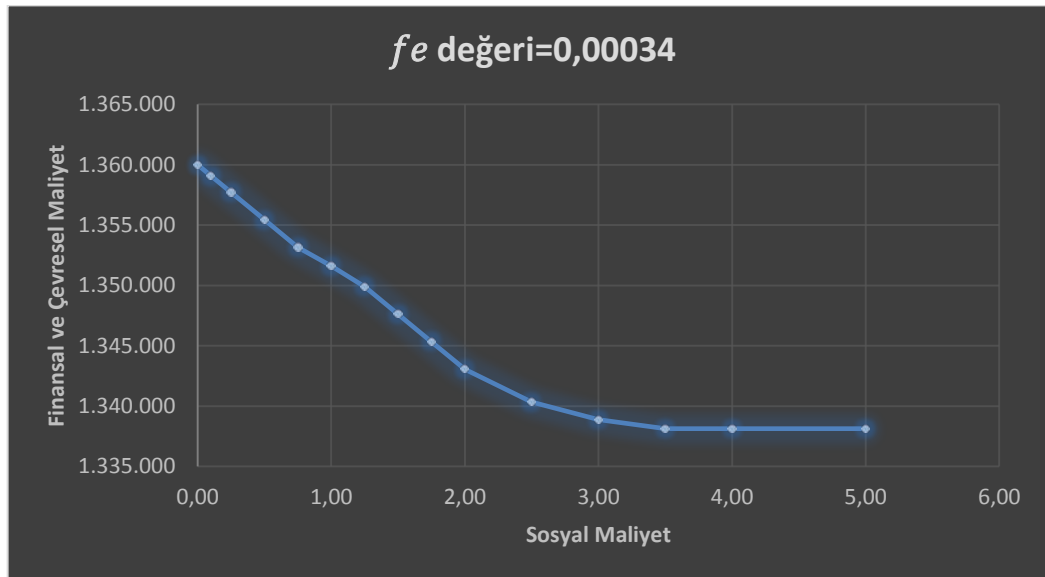
$$\text{Enk } Z = f_c FC + \sum_j s_j f_s + \sum_j w_j f_d + f_v \sum_{j \in N_0} x_{0jk} + f_b FC \quad (5.1)$$

Kısıtları altında,

$$\sum_j w_j f_a + \sum_{i,j} e_{ij} f_e \leq K \quad (5.2)$$

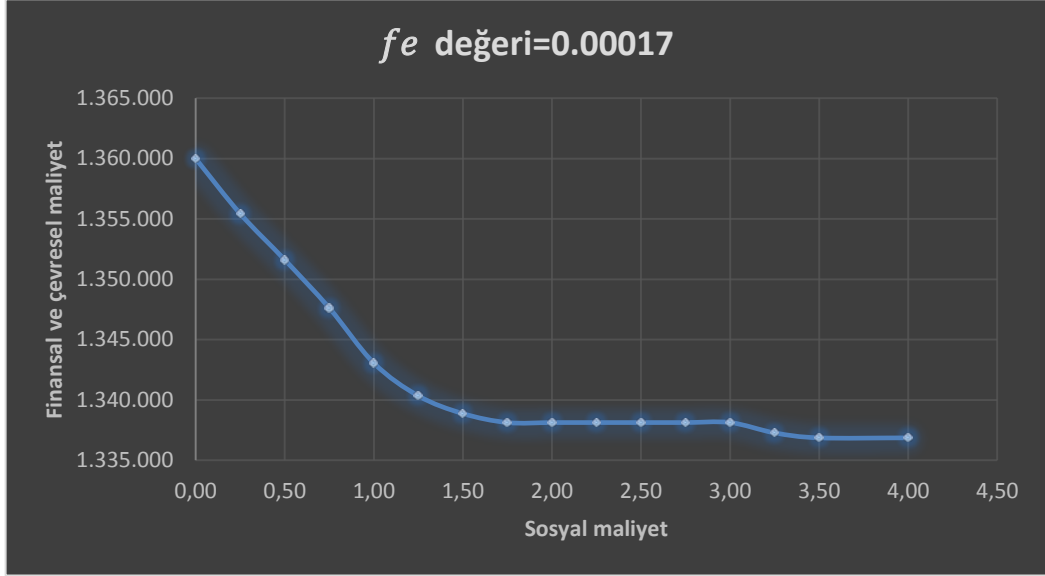
(3.7)-(3.23) arasındaki kısıtlara eklenmiştir.

Model A'da sosyal maliyet amaç fonksiyonundan çıkarılmış ve kısıtlara eklenmiştir. Sonuçlar şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Model çok amaçlı hale getirilmeden önce senaryo b için elde edilen en iyi sonuçta sosyal maliyet 3.083 olarak elde edilmiştir. Modelin çok amaçlı halinde sosyal maliyetin 3.083'ten daha düşük bir değer alması istendiğinde finansal ve çevresel maliyetin arttığı görülmüştür. Sosyal maliyetin 3.083'ten daha büyük bir değer almasına izin verildiği zaman finansal ve çevresel maliyetin sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.1. Model A f_e değeri=0,00034

Modelde f_e değeri yarıya indirilip en iyi çözüm elde edildiğinde sosyal maliyet=1.542 değerini almıştır. Model çok amaçlı hale getirildiğinde sosyal maliyet değerinin 1.542'den daha düşük bir değer alması istendiğinde finansal ve çevresel maliyetin arttığı gözlenmiştir. Sosyal maliyetin 1.542'den daha büyük bir değer almasına izin verildiğinde finansal ve çevresel maliyet bir yere kadar sabit kalmış, ardından biraz daha azalmış ve sabit kalmıştır.



Şekil 5.2. Model A f_e değeri=0,00017

5.2. Model B

İkinci durum olarak Model B'de, çevresel maliyete karşı sosyal ve finansal maliyet çözümlenmiştir.

$$\text{Enk } Z = f_c FC + \sum_j s_j f_s + \sum_j w_j f_d + f_v \sum_{j \in N_0} x_{0jk} + \sum_j w_j f_a + \sum_{i,j} e_{ij} f_e \quad (5.3)$$

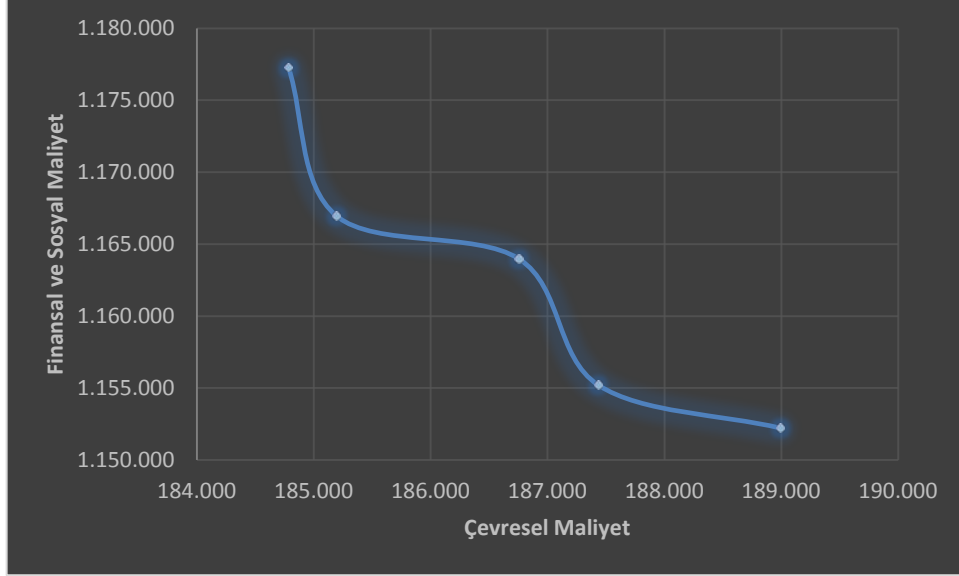
Kısıtları altında,

$$f_b FC \leq K \quad (5.4)$$

(3.7)-(3.23) arasındaki kısıtlara eklenmiştir.

Model B'de çevresel maliyet amaç fonksiyonundan çıkarılmış ve kısıtlara eklenmiştir. Model çok amaçlı hale getirilmeden önce senaryo b için elde edilen en iyi çözümde çevresel maliyetin değeri 188.997 olarak elde edilmiştir. Çevresel maliyet değerinin 188.997'den daha düşük bir değerler alması istendiğinde finansal ve çevresel maliyet artmıştır. Çevresel maliyetin alabildiği en düşük değer 184.786 olmuştur. Daha düşük değerler elde edilmek istendiğinde modelin uygun çözümü bulunamamıştır.

Çevresel maliyetin 189'dan daha büyük değerler almasına izin verildiğinde çözüm değişmemiştir, en iyi değer korunmuştur.



Şekil 5.3. Model B

6. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

“Kirlilik rotalama problemleri klasik rotalama probleminin kapsamlısı olduğu için NP-Zor sınıfındadır.” (Demir, Bektaş ve Laporte, 2014). Bektaş ve Laporte (2011) orta boyutlu problemin kesin yöntemlerle çözülemediğini göstermişlerdir. Bu yüzden sezgisel çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Metasezgisel yöntemler, esin kaynağı (doğal veya yapay), kullandığı başlangıç çözüm (popülasyon veya tek çözüm), kullanılan amaç fonksiyonu (dinamik, statik), komşuluk yapısı (tekli, çoklu) ve hafıza durumu (hafızalı, hafızasız) gibi kriterlere sınıflandırmaya tabi tutulabilir. (Blum ve Roli, 2003)

Literatürde ARP çözümleri için geliştirilen birçok sezgisel yöntem vardır. Bunlardan biri de tavlama benzetimidir.

TB (Tavlama Benzetimi) rassal bir arama yöntemidir. Katıların fiziksel tavlama sürecinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Katıların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu ısıda bir süre tutulması ve yavaş yavaş soğutulması esasına dayanır. Bu aşamada soğutma işlemi farklı sıcaklıklarda ve farklı soğutma oranlarıyla yapılabilmektedir. TB ilk olarak Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi (1983) tarafından tanıtılmıştır. TB literatürde birçok problemin çözümünde kullanılmıştır. Aksen v.d. (2014) çalışmalarında rota iyileştirme yöntemlerinden bahsetmişlerdir. Rotaya yeni bir eleman ekleme, rotadan bir eleman çıkarma, rotanın sıralamasını değiştirme bunlardan bazılarıdır.

Alternatif bağlantılar içeren ve farklı hız seviyelerinin olduğu çok amaçlı doğrusal matematiksel modelin çözümünde GAMS 21.3 kullanılmıştır. Fakat orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde yeterli sonuç elde edilememiştir. Bu nedenle ortaya konulan amaç fonksiyonu kullanılarak kabul edilebilir süreler içerisinde uygun çözüm elde edilebilecek bir meta-sezgisel önerilmiştir.

Bu problemin çözümü için geliştirilen meta-sezgisel yöntem Microsoft-Excel içerisinde Visual Basic programlama dili kullanılarak modellenmiştir. Excel sayfalarına elde edilen çözümdeki rota, noktalar arası seçilen bağlantılar ve hız seviyeleri, elde edilen rota süresi ve en iyi değer bilgileri girilmektedir. Bu problem için noktalar arası 3 bağlantı ve her bağlantı için 2 hız seviyesi kullanılmıştır. Her bir Excel sayfasına noktalar arası uzaklık ve hız değerleri girilmiştir. ZP değerleri ve noktaların talepleri ve servis süreleri de ayrı ayrı Excel sayfalarına girilmiştir. Modelin çözümü için gerekli bazı değerler, yüksek sıcaklık değeri ve sıcaklık düşürme oranı da bir Excel sayfasına girilmektedir. Sezgisel yöntemin kullandığı ilk rota bilgileri sonucu rassal olarak

oluşturulmuştur. Sezgisel yöntemin çözümü sonucunda elde edilen sonuçlar da başka bir Excel sayfasına makro tarafından yazılmaktadır.

Algoritma 1. Tavlama Benzetimi

Kullanılan programın çalışma mekanizmasını göstermek için sözde kod gösterimi verilmiştir. Tavlama benzetiminin çalışma esası şu şekildedir:

Nokta sayısına göre uzaklık, hız, servis süresi, zaman penceresi ve talep değerlerini gir;

Başlangıç çözüm rota bilgilerini ve toplam maliyet bilgisini gir;

Yüksek sıcaklığı(T), sıcaklık düşürme oranını(t) ve artırma sayısını(y) gir;

$X_{Eniyi} \leftarrow X_{şimdiki} \leftarrow X_{başlangıç};$

$T=T;$

$y=1;$

1-10 aralığında bir rassal sayı($ras1$) üret;

Eğer $ras1 < 5$ ise;

2 rota seç;

Seçilen rotalarda bir nokta seç;

Seçilen noktaları değiştir;

Değiştirilen noktaların bir önceki ve bir sonraki noktaları arasındaki uzaklık ve hız değerlerine göre en düşük yakıt tüketimini veren uzaklık ve hız değerini seç;

Seçilen uzaklık ve hız değerine göre her nokta için o noktada servise başlama zamanının zaman penceresi değerlerine göre kontrolünü yap;

Değerler sağlanmıyorsa $y=y+1$;

Değerler sağlanıyorsa toplam rota süresini hesapla;

X_{yeni} değerini hesapla;

Eğer $X_{yeni} < X_{şimdiki}$, $X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Değilse $v=e^{-(X_{yeni}-X_{şimdiki})/T}$;

Rassal sayı(a) üret $a \in [0,1]$;

Eğer $a < v$;

$X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Eğer $X_{şimdiki} < X_{Eniyi}$;

$X_{yeni} \leftarrow X_{şimdiki}$;

$y=y+1$;

Eğer $rasl \geq 5$ ve $rasl < 8$ ise

Bir rota seç;

Seçilen rotada bir nokta seç;

Seçilen noktayla bir sonraki nokta arasındaki bağlantıyı değiştir;

X_{yeni} değerini hesapla;

Eğer $X_{yeni} < X_{şimdiki}$, $X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Değilse $v=e^{-(X_{yeni}-X_{şimdiki})/T}$;

Rassal sayı(a) üret $a \in [0,1]$;

Eğer $a < v$;

$X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Eğer $X_{şimdiki} < X_{Eniyi}$;

$X_{yeni} \leftarrow X_{şimdiki}$;

$y=y+1$;

Eğer $rasl \geq 8$ ise

Bir rota seç;

Seçilen rotada bir nokta seç;

Seçilen noktayla bir sonraki nokta arasındaki hız seviyesini değiştir;

X_{yeni} değerini hesapla;

Eğer $X_{yeni} < X_{şimdiki}$, $X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Değilse $v = e^{-(X_{yeni} - X_{şimdiki})/T}$;

Rassal sayı(a) üret $a \in [0,1]$;

Eğer $a < v$;

$X_{şimdiki} \leftarrow X_{yeni}$;

Eğer $X_{şimdiki} < X_{Eniyi}$;

$X_{yeni} \leftarrow X_{şimdiki}$;

$y = y + 1$;

$T = T - t$;

6.1. Sezgisel Yöntem Sonuçları

20, 50 ve 100 nokta örnekleri için sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Farklı parametreler kullanılarak algoritma çalıştırılmıştır. Her örnek için problem aynı parametrede üç kez, 3 farklı parametreyle toplamda dokuz kez çalıştırılmıştır ve elde edilen en iyi sonuç eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Tablo 6.1'e bakıldığında en iyi çözüme yakınlığın Gams sonucunda elde edilen sonuçtan daha iyi olmadığı fakat daha kısa sürede çalıştığı görülmüştür. Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'teki sonuçlara bakıldığında sezgisel sonucunda elde edilen sonucun Gams sonucunda elde edilen sonuca daha yakın olduğu görülmektedir. Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'e bakıldığında sezgisel sonucunun Gams sonucuna daha yakınlaştığı, Tablo 6.6'da sezgisel sonucunda elde edilen sonucun çok daha kısa sürede Gams sonucundan daha iyi bir çözüm elde ettiği görülmüştür. Tablo 6.7'de sezgisel sonucunda elde edilen sonucun Gams sonucuna kısa zamanda çok yakınlaştığı görülmektedir.

6.1.2. 20 nokta sonuçları

Tablo 6.1. Senaryo a-20 nokta sonuçları

T				t	y		Toplam Süre (sa)	
100				0,01	100		1,03	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet (tl)	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=7,92 2=8,87 3=8,52	1=0 2=0 3=0	167,58	2,16	2138,9	448,15	2589,24	% 17,55	%38

Tablo 6.2. Senaryo b-20 nokta sonuçları

T				t	y		Toplam Süre (sa)	
100				0,01	100		1,03	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=8,19 2=9,67 3=7,06	1=0 2=0,67 3=0	141,12	66,57	2006,5	376,79	2449,8 6	% 12,8	%23,8

Tablo 6.3. Senaryo c-20 nokta sonuçları

T				t	Y		Toplam Süre (dk)	
100				0,1	100		5,6	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=5,98 2=8,83 3=8,82	1=0 2=0 3=0	136,4	6,57	1920,25	364,18	2291	% 7,36	%8

6.1.2. 50 nokta sonuçları

Tablo 6.4. *Senaryo a-50 nokta sonuçları*

T				t	Y		Toplam Süre (dk)	
100				0,1	100		7,5	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=8,12	1=0	219,85	8,2	3390,7	586,9	3985,8	%31,07	%36,4
2=5,94	2=0							
3=6,71	3=0							
4=8,1	4=0							
5=6,08	5=0							
6=5,94	6=0							

Tablo 6.5. *Senaryo b-50 nokta sonuçları*

T				t	Y		Toplam Süre (sa)	
100				0,01	100		1,25	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=8,56	1=0	242,8	82,7	3774,7	648,4	4505,8	%38,21	%42,8
2=8,03	2=0							
3=6,26	3=0							
4=9,81	4=0,81							
5=8,97	5=0							
6=8,84	6=0							

Tablo 6.6. *Senaryo c-50 nokta sonuçları*

T				T	Y		Toplam Süre (dk)	
100				0,1	100		7,5	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=5,74	1=0	251,6	8,36	3638,9	671,9	4319,16	%32,38	%26
2=6,34	2=0							
3=8,68	3=0							
4=8,66	4=0							
5=7,37	5=0							
6=6,95	6=0							

6.1.3. 100 nokta sonuçları

Tablo 6.7. Senaryo a-100 nokta sonuçları

T				T	Y		Toplam Süre (dk)	
100				0,1	100		8,06	
Rota Süresi (sa)	Rota Süresini Aşan Süre (sa)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet	Finansal Maliyet	Çevresel Maliyet	Toplam Maliyet	Gams Sonucu en iyi çözüme yakınlık	Sezgisel sonucu en iyi çözüme yakınlık
1=7,49	1=0	435,39	11,23	7075,61	1162,49	8249,33	%39,41	%42
2=7,95	2=0							
3=8,85	3=0							
4=7,75	4=0							
5=6,82	5=0							
6=8,04	6=0							
7=7,45	7=0							
8=7,83	8=0							
9=9,004	9=0,004							
10=8,44	10=0							
11=7,85	11=0							
12=8,6	12=0							

Sezgisel yöntem sonucunda elde edilen sonuçlara bakıldığında sezgisel yöntemin kısa sürede iyi bir sonuç elde ettiği fakat küçük boyutlu problemler için çok iyi bir çözüm elde edemediği görülmüştür.

Ele alınan model gereği, sezgisel yöntem içerisinde çok fazla değişken ve dizi tanımlanması gerekmektedir. Rotalar için her rota bilgisi, rotaların yol ve hız bilgileri, yakıt tüketimi, rota süresi, beklenen rota süresini aşan süre, rota süreleri arası fark bilgileri tutulmaktadır. Bu bilgiler en iyi, şimdiki ve yeni rota değerleri için tutulduğundan dizi ve değişken sayısı daha da artmaktadır. Algoritma içerisinde rotada değişiklik yapıldığında rota sıralaması, rotanın yol ve hız değerleri, yakıt tüketimi, rota süresi, beklenen rota süresini aşan süre ve değişen rotayla diğer rota süreleri arası fark ve toplam maliyet de değişeceği için her değişiklik sonucunda birçok hesaplama yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar programlamada satır sayısını artırmaktadır. Noktalar arası 3 alternatif yol ve her yol için 2 hız seviyesinin bulunması 2 nokta arasında 6 farklı seçenek oluşturmaktadır. Seçilen yol ve hız seviyesine göre matristen seçilen yolun ve hızın değerlerinin okunması gerekmektedir. Rotadaki bilgilere göre program seçilen yol ve hız değerlerini okuyarak işlem yapar. Bu durum da işlem içinde

bir kontrol mekanizmasının olmasını gerektirir ve böylece programlamadaki satır sayısında diğer rotalama problemlerine göre artış olmaktadır.

Ele alınan problemde ZP değerleri kullanılmaktadır. Rotalarda iki nokta arasında seçilen yol ve hız seviyesine göre ZP değerlerine uygunluk değişmektedir. Rota sıralaması değişmeden bir yol ve hız seviyesinde tüm ZP kısıtları sağlanırken başka bir yol veya hız seviyesinde uygunluk bozulabilmektedir.

Rotalarda iki nokta arasındaki bağlantı koparılıp başka noktalarla bağlantı yapıldığında değişen sıralamada değişen noktanın bir önceki ve bir sonraki noktayla arasındaki yol ve hız değerlerine yeni değerlerin atanması gerekecektir. Atanan bu değerlerin neye dayanarak atanacağı bir sorundur. Ele alınan model çok amaçlı olduğu için sadece bir amaç en iyilenirse diğer amaçlarda kötüleşme sağlanacaktır. Amaçlar arası ödünleşimin dengeli olması gerekmektedir. Ayrıca ele alınan problemde ZP kısıtları olduğu için bağlantıların koparılıp yeni bağlantıların kurulması elde edilen çözümü uygun çözüm olmaktan çıkarabilmektedir. Eldeki uygun çözüm daha iyileştirilmek istenirken uygun olmayan çözüme doğru gidilebilir. Bu yüzden geliştirilen algoritmada üç farklı iyileştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu durumda yavaş bir iyileşme sağlamıştır.

Geliştirilen algoritma ile GAMS'in altı saat çalışması sonucunda elde edilen sonuçtan daha iyi bir sonuç bir örnek dışında elde edilememiştir fakat kısa sürede iyi bir çözüm vermiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üçlü sorumluluk yaklaşımı altında alternatif bağlantılı araç rotalama problemi incelenmiştir. Küçük ölçekli problemlerin çözümü için karma tam sayılı doğrusal matematiksel model önerilmiştir. Farklı senaryolara ve parametrelere göre modelin çözümündeki ve finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonlarındaki değişiklikler gözlenmiştir. Model çok amaçlı hale getirilmiş, amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim gözlenmiştir. Önerilen matematiksel model ile bu problem üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Orta ve büyük boyutlu problemler için tavlama benzetimi sezgiseli kullanılarak bir algoritma önerilmiştir. Geliştirilen algoritmanın çalışma prensibi ve elde edilen sonuçları sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Geliştirilen algoritma sonucunda kısa sürede iyi bir çözüm elde edildiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda ekleme-çıkarma yöntemleri de algoritmaya eklenerek daha iyi sonuçların elde edilmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Aksen, D., Kaya, O., Salman, F., S., Tüncel, Ö., 2014, An adaptive large neighborhood search algorithm for a selective and periodic inventory routing problem: *European Journal Of Operational Research* 239 413-426
- Alameen, M., Aljamal, R., Damrah, S., 2016, A Clarke and Wright improved algorithm to solve the vehicle routing and traveling salesman problem: *Global Journal of Enterprise Information System* DOI: 10.18311/gjeis/2016/7288
- Banos, R., Ortega, J., Gil, C., Marquez, A., Toro, F., 2013, A hybrid meta-heuristic for multi-objective vehicle routing problems with time Windows: *Computers& Industrial Engineering* 65 286-296
- Banos, R., Ortega, J., Gil, C., Fernandez, A., Toro, F., 2013, A simulated annealing-based parallel multi-objective approach to vehicle routing problems with time windows: *Expert Systems With Applications* 40 1696-1707
- Bektaş, T., Laporte, G., 2011 The pollution-routing problem: *Transportation Research Part B* 45 1232-1250
- Blum, C., Roli, A., 2003, Metaheuristic in combinatorial optimization: Overview and Conceptual Comparison: *ACM Computing Surveys*, 35 (3) 268-308
- Cinar, D., Gakis, K., Pardalos, P., M., 2015, Reduction of CO_2 emissions in cumulative multi-trip vehicle routing problems with limited duration; *Environ Model Assess* 20:273-284
- Clarke, G., Wright, J., 1964, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points: *Operational Research* 12(4):568-581
- Cheng, C., Qi, M., Wang, X., Zhang, Y., 2016 Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations: *Int. J. Production Economics* 182 263–275
- Çetin, S., Gencer, C., 2010, Kesin zaman pencereli- eş zamanlı dağıtım toplamalı araç rotalama problemi: *Matematiksel Model: Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (3) 579-585
- Dantzig, G., B., Ramser, J., H., 1959, The truck dispatching problem: *Management Science* 6(1) 80-91
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte G., 2014 The bi-objective pollution routing problem: *European Journal of Operational Research* 232 464-478
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte G., 2012 An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem: *European Journal of Operational Research* 223 346-359
- Eguia, I., Racero, J., Molina, J., C., Guerrero, F., 2013. Environmental issues in vehicle routing problems, in sustainability appraisal: Quantitative Methods and Mathematical Techniques for Environmental Performance Evaluation, *EcoProduction*, editors: M. G. Erechtkhoukova et al., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Elbasan, S., 2015, Karbon ayak izini dikkate alan eşzamanlı topla-dağıt araç rotalama, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 109s.
- Erdoğan, S., Miller-Hooks, E., 2012, A green vehicle routing problem: *Transportation Research Part E* 48 100-114
- Erdoğan, P., Yalçın, E., 2015, Parçacık sürü optimizasyonu ile kısıtsız optimizasyon test problemlerinin çözümü: *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 4, Sayı 1, 14-22
- Fagerholt, K., Laporte, G., Norstad I., 2009, Reducing Fuel Emissions By Optimizing Speed On Shipping Routes: *Journal of the Operational research Society* 61, 523-529
- Felipe, A., Ortuno, M., T., Righini, G., Tirado, G., 2014, A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges: *Transportation Research Part E* 71 111-128
- Franceschetti, A., Honhon, D., Woensel, T., V., Bektaş, T., Laporte G., 2013 The time dependent pollution-routing problem: *Transportation Research Part B* 56 265-293
- Franceschetti, A., Demir, E., Honhon, D., Woensel, T., V., Laporte G., Stobbe, M., 2017 A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem: *European Journal Of Operational Research* 259 972-991
- Ghorbani, A., Jokar, M., R., A., 2016, A hybrid imperialist competitive-simulated annealing algorithm for a multisource multi-product location-routing-inventory problem: *Computers&Industrial Engineering* 101 116-127
- Ghoseiri, K., Ghannadpour, S., F., 2010, Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm: *Applied Soft Computing* 10 1096-1107
- Jozefowicz, N., Semet, F., Talbi, E., 2008, Multi-objective vehicle routing problems: *European Journal of Operational Research* 189 293-309
- Kara, I., Kara, B., Y., Yetis, M., K., 2007, Energy minimizing vehicle routing problem: *Combinatorial Optimization And Applications* 2007 62-71
- Kaya, O., Urek, B., 2016 A mixed integer location, inventory and pricing model for closed loop supply chain: *Computers& Operations Research* 65 93-103
- Kim, G., Ong, Y., S., Heng, C., K., Tan, P., S., Zhang, N., A., 2015, City vehicle routing problem: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 1654-66.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., D., Vecchi, M., P., 1983, Optimization by simulated annealing; *Science*, 220, 671-680

- Koç Ç., 2012, Zaman bağımlı araç rotalama problemi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 60s.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., Laporte, G., 2014, The fleet size and mix pollution-routing problem: *Transportation Research Part B* 70 239-254
- Koç, Ç., Karaoglan, I., 2016, The green vehicle routing problem : A heuristic based exact solution approach: *Applied Soft Computing* 39 154-164
- Kopfer, H., W., Schönberger, J., Kopfer H., 2013, Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet: *Springer Science+Business Media* 26:221-248
- Kramer, R., Maculan, N., Subramanian, A., Vidal, T., 2015, A speed and departure time optimization algorithm for the pollution-routing problem: *European Journal Of Operational Research* 247 782-787
- Kumar, R., S., Kondapaneni, K., Dixit, V., Goswami, A., Thakur, L., S., Tiwari, M., K., 2016, Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization approach: *Computers&Industrial Engineering* 99 29-40
- Kuo, Y., 2010, Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem: *Computers&Industrial Engineering* 59:157-165
- Küçüköğlü, İ., Ene, S., Aksoy, A., Öztürk, N., 2015, A memory structure adapted simulated annealing algorithm for a green vehicle routing problem: *Environ Sci Pollut Res* 22:3279-3297
- Larsen, A., 2001, The dynamic vehicle routing problem, Ph.D. Thesis, Department of Mathematical Modelling(IMM), Technical University of Denmark, Denmark
- Li, H., Yuan, J., Lv, T., Chang, X., 2016, The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems considering carbon dioxide emissions: *Transportation Research Part D* 49 231- 245
- Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H., Lam, H.Y., 2014, Survey of green vehicle routing problem: Past and Future Trends: *Expert Systems With Applications* 41 1118-1138
- Maden, W., Eglase, R., Black D., 2010, Vehicle routing and scheduling with time-varying data: A case study: *Journal of the Operational research Society* 61,515-522
- Molina, J., C., Eguia, I., Racero, J., Guerrero, F., 2014, Multi-objective vehicle routing problem with cost and emission functions: *Procedia-Social And Behavioral Sciences* 160 254-263

- Mousavi, S., M., Moghaddam, R., T., 2013, A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain: Journal of manufacturing Systems 32 335-347
- Naderipour, M., Alinaghian, M., 2016, Measurement, evaluation and minimization of CO_2 , NO_x and CO emission in the open time dependent vehicle routing problem: Measurement 90 443- 452
- Öztürk, C., Hançer, E., Karaboğa, D., 2014, Küresel en iyi yapay arı kolonisi algoritması ile otomatik kümeleme: Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 29, No 4, 677-687
- Suzuki, Y., 2010, A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission: Transportation Research Part D 16 73-77
- Şahin, Y., Eroğlu, A., Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi için metasezgisel yöntemler: Bilimsel Yazın Taraması: Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 19, Sayı 4, 337-355
- Talbi, El-Ghazali, 1965 Metaheuristic from design to implementation, 7
- Teng, L., Zhang, Z., 2016, Green vehicle routing problem with load factor: Advances in Transportation Studies an international Journal 2016 Special Issue, Vol. 3
- Yu, V., F., Redi, P., A.A.N., Hidayat, Y., A., Wibowo, O., J., 2017, A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem: Applied Soft Computing 53 119-132
- Weare, E., E., H., Savelsbergh, M., W., P., 2016, The bi-objective mixed capacitated general routing problem with different route balance criteria: European Journal Of Operational Research 251 451-465
- Barth, M., Younglove, T., Scora, G., 2005, Development of a heavy-duty diesel model emissions and fuel consumption model: <http://escholarship.org/uc/item/67f0v3zf>

EKLER

EK-1. 50 Nokta İçin Senaryo b ZP Değerleri

	a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)
1	0	4	11	6	10	21	2	6	31	2	6	41	3	7
2	2	6	12	4,5	8	22	2	6	32	0	4	42	6	10
3	3	7	13	2	6	23	6	10	33	2,5	6,5	43	1	5
4	2,5	6,5	14	2,5	6,5	24	3	7	34	2	6	44	0	4
5	1,5	5,5	15	6	10	25	1	5	35	3	7	45	2	6
6	6	10	16	6	10	26	6	10	36	6	10	46	2,5	6,5
7	6,5	10	17	6	10	27	1	5	37	1	5	47	2	6
8	3	7	18	2	6	28	2,5	5,5	38	3	7	48	6	10
9	5	7,5	19	3	7	29	3	7	39	2,5	5,5	49	3	7
10	4	7,5	20	0	4	30	6	10	40	2,5	5,5	50	3	7

EK-2. 50 Nokta İçin Senaryo c ZP değerleri

	a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)		a(i)	b(i)
1	1	3	11	1	3	21	0	3	31	0	3	41	6	9
2	1,5	3,5	12	5	7	22	5	7	32	4	7	42	7	9
3	6	9	13	0	2,5	23	0	2,5	33	5	7	43	3	5,5
4	2	4	14	4	6,5	24	7,5	10	34	7	9	44	5	7
5	5	7	15	1,5	3,5	25	1,5	3,5	35	0	2,5	45	4	6,5
6	4	6,5	16	1	3	26	3	5,5	36	3	5,5	46	0	3
7	7,5	10	17	5	7	27	1	3	37	4	6,5	47	7	9
8	0	3	18	7,5	10	28	2	4	38	7,5	10	48	1,5	3,5
9	3	5,5	19	2	4	29	6	9	39	2	4	49	4,5	7
10	7	9	20	6	9	30	7,5	1	40	1	3	50	2	4