



## A sustainable vehicle routing problem with alternative road and speed options

İlknur Tükenmez<sup>1\*</sup>, Onur Kaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 26040, Eskişehir, Turkey

<sup>2</sup>Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 26555, Eskişehir, Turkey

### Highlights:

- Mathematical Model with Financial, Environmental and Social Objective Functions
- Alternative way and Speed Selections
- Multi Objective Problem Solving Methods

### Keywords:

- Vehicle Routing
- Sustainability
- Alternative Links
- Speed Selection
- Multi Objective

### Article Info:

Research Article  
Received: 08.09.2020  
Accepted: 05.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.791935

### Correspondence:

Author: İlknur Tükenmez  
e-mail:  
itukenmez@ogu.edu.tr  
phone: +90 222 239 3750 /  
3614

### Graphical/Tabular Abstract

Economic, environmental and social considerations are three main pillar of sustainability and maintaining the balance between them is the key issue to achieve sustainability. In addition, the regulations in different countries concerning driver working hours and CO<sub>2</sub> emissions create new challenges for the logistics companies in their operations. Motivated by the emerging environmental and social considerations in logistics companies, we propose a novel multi objective mixed integer linear programming model for vehicle routing problem with financial, environmental and social objectives, considering different speed choices and alternative links with different characteristics between nodes. The results of the developed models with varying system parameters are discussed through detailed numerical experiments and significant managerial insights are obtained. It is observed that there is a significant trade-off between social, environmental and financial objectives and better balanced results can be obtained by considering these objectives simultaneously. The routes used by the vehicles are also significantly affected by the characteristics of the system parameters.

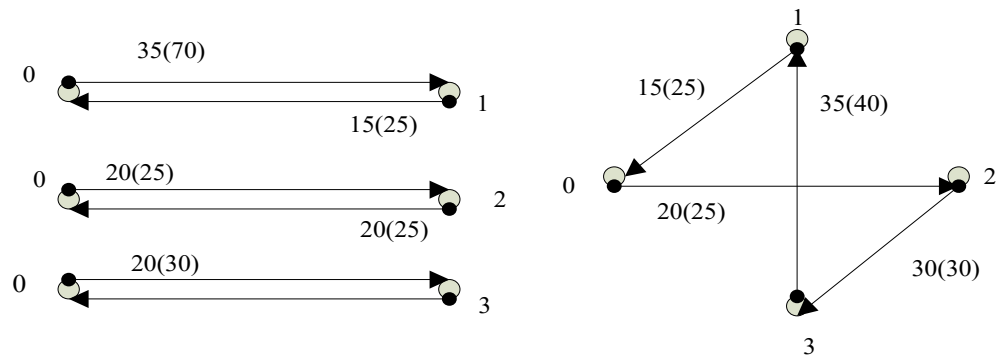


Figure A: Different Routes with Different System Parameters

**Purpose:** Most of the vehicle routing problem assumes at most one link between two nodes. This study, we assume there are more than one link between nodes, and these links have different long, duration and cost. In addition, financial, environmental and social objectives are considered simultaneously.

### Theory and Methods:

A multi objective mixed integer linear mathematical model for this problem is developed and a novel hybrid method is proposed in addition to the weighted sum method for the scalarization of the multi objective problem.

### Results:

We observe that the tradeoffs between the objectives become an important issue in determining the optimal routes and more balanced results can be obtained by considering these objectives simultaneously. The choice among the possible alternative links and the speed choice depend highly on the objective of the company and the constraints of the problem.

### Conclusion:

We determine the optimal routes to deliver the products to a set of customers in order to minimize the financial, environmental and social objectives at the same time.



## Alternatif yol ve hız seçimleri içeren sürdürülebilir araç rotalama problemi

İlknur Tükenmez<sup>1\*</sup>, Onur Kaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları içeren matematiksel model
- Alternatif yol ve hız seçimleri
- Çok amaçlı problem çözme yöntemleri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.09.2020

Kabul: 05.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.791935

### Anahtar Kelimeler:

Araç rotalama,  
sürdürülebilirlik,  
çok amaçlı,  
alternatif bağlantı

### ÖZ

Finansal, çevresel ve sosyal hususlar sürdürülebilirliğin üç ana bileşenidir ve bu bileşenler arasındaki dengeyi korumak sürdürülebilirliği sağlamak açısından önem taşımaktadır. Son zamanlarda CO<sub>2</sub> salınımıyla ilgili ve sürücülerin çalışma saatleri üzerine yapılan düzenlemeler lojistik firmalarının faaliyetlerinde yeni zorluklara yol açmıştır. Lojistik firmalarında çevresel ve sosyal hususlarda ortaya çıkan zorluklar nedeniyle bu çalışmada finansal, çevresel ve sosyal amaçlı, noktalar arasında alternatif yol ve hız seviyeleri içeren araç rotalama problemi için çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model için farklı sistem parametreleri ile ayrıntılı sayısal deney sonuçları elde edilmiştir. Finansal, çevresel ve sosyal amaçların arasında önemli bir ödünleşim olduğu ve bu amaçlar birlikte ele alındığında daha dengeli sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. Ayrıca oluşturulan araç rotalarının da sistem parametrelerinden etkilendiği görülmektedir.

## A sustainable vehicle routing problem with alternative road and speed options

### H I G H L I G H T S

- Mathematical Model with financial, environmental and social objectives,
- Alternative ways and speed selections,
- Multi objective problem solving methods

### Article Info

Research Article

Received: 08.09.2020

Accepted: 05.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.791935

### Keywords:

Vehicle routing,  
sustainability,  
multi objective,  
alternative links

### ABSTRACT

Economic, environmental and social considerations are three main pillar of sustainability and maintaining the balance between them is the key issue to achieve sustainability. In addition, the regulations in different countries concerning driver working hours and CO<sub>2</sub> emissions create new challenges for the logistics companies in their operations. Motivated by the emerging environmental and social considerations in logistics companies, we propose a novel multi objective mixed integer linear programming model for vehicle routing problem with financial, environmental and social objectives, considering different speed choices and alternative links with different characteristics between nodes. The results of the developed models with varying system parameters are discussed through detailed numerical experiments and significant managerial insights are obtained. It is observed that there is a significant trade-off between social, environmental and financial objectives and better balanced results can be obtained by considering these objectives simultaneously. The routes used by the vehicles are also significantly affected by the characteristics of the system parameters.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : itukenmez@ogu.edu.tr, onur\_kaya@eskisehir.edu.tr /

Tel: +90 222 239 3750 / 3614

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemi (ARP) depodan müşterilere amaç fonksiyonu ve kısıtlar altında ürünlerin dağıtımını için en iyi rotanın belirlenmesi olarak tanımlanabilir. ARP farklı endüstrilerde özellikle lojistik sektöründe geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu şirketler için ana maliyet faktörleri arasından taşıma maliyetlerini etkilemesi nedeniyle en uygun rotaları belirlemek önemli bir konudur. Bununla birlikte bugünün dünyasında finansal amacın yanında çevresel ve sosyal konulardaki hassasiyet de artmaktadır. Şirketler de CO<sub>2</sub> salınım kurallarına bağlı hale gelmektedir ve bu durum şirketler için yeni zorlukları ortaya çıkarmaktadır [1, 2]. Buna ek olarak sürücüler sürücü çalışma saati yasalarına tabidir ve çalışma saatleri arasındaki dengesizlikler şirketle sürücüler arasında soruna neden olabilmektedir [3, 4]. Bu nedenle şirketlerin daha keyifli bir çalışma ortamı oluşturmak için bu sosyal konulara odaklanmaları gerekir. Bu gerekçelerle Tükenmez [5]'in yüksek lisans tezinden üretilen bu çalışmada ARP finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları altında ele alınmış ve amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim analiz edilmiştir.

Literatürdeki çoğu ARP'de her iki nokta çifti arasında doğrudan tek bir bağlantının olduğu varsayılmaktadır [6]. Fakat gerçek hayatta iki nokta arasında doğrudan ulaşımı sağlayan birden fazla yol bulunabilir [5, 7]. Buna ek olarak bu yollar uzunluk, süre ve maliyet açısından farklılıklar göstermektedir. Örneğin bir yol diğerlerine göre daha kısa olmasına rağmen trafik yoğunluğu veya hız limitleri nedeniyle ulaşımı daha uzun sürede sağlayabilmektedir. Benzer şekilde bazı ücretli yollar daha kısa veya daha hızlı olabilmektedir ancak ek ödeme gerektirerek daha yüksek maliyetlere yol açabilir. Garaix vd. [7] çalışmalarında düğümler arası alternatif bağlantıları da dikkate almışlardır. Bu alternatif yollar tek bir bağlantının yanında başka düğümlere de uğranarak gidilebilen yolları da ifade eder. Literatürde farklı özelliklere sahip alternatif yolların olduğu kabul edildiğinde bu yollardan modelin hedefine göre en hızlı veya en kısası modelde tek bir bağlantı olarak alınır ve daha uzun veya yavaş yolların asla seçilmeyeceği varsayılarak diğer alternatifler ihmal edilir. Fakat gerçek hayatta trafik düzenlemeleri, trafik yoğunluğu, hız sınırları, ücretli yollar gibi nedenlerle en kısa yol her zaman en hızlı veya en ucuz yol olmayabilir. Modelin amaç fonksiyonu ve kısıtlarına bağlı olarak aynı şebekede bazen bir noktadan diğerine gitmek için daha hızlı ancak daha uzun bir yol seçilebilirken bir diğer bağlantıda daha kısa ve daha yavaş olan yol seçilebilir. Örneğin aynı rotadaki iki nokta için zaman pencereli bir modelde eğer zaman aralığı dar ise maliyetinin yüksek olmasına rağmen hızlı olan yol seçilebilirken zaman aralığı geniş ise zaman penceresinin izin verdiği ölçüde maliyeti düşürme amacıyla daha uzun veya daha yavaş olan yol seçilebilir. Belirli bir ağda noktalar arasında alternatif bağlantıların olması alternatif rotalar olmasından farklı bir durumdur. Örneğin Google Haritalar bir noktadan diğerine giden her biri farklı uzunluk, süre ve maliyet değerlerine sahip farklı alternatif bağlantılar sağlar

ve bir düğümden diğerine gitmek için bu bağlantılardan yalnızca birini seçeriz. Literatürde bunu dikkate alan çalışmaların pek olmaması ve bu boşluğu doldurma amacıyla farklı uzunluk, süre ve maliyet değerlerine sahip alternatif doğrudan bağlantıları içeren amaç fonksiyonu ve kısıtlar altında en iyi rotayı veren modelin geliştirilmesi bu çalışmada kapsamında amaçlanmıştır.

Bu çalışmada yakıt maliyeti, sürücü maliyeti ve araç maliyeti finansal amaç fonksiyonu olarak; CO<sub>2</sub> salınımı çevresel amaç fonksiyonu olarak; sürücülerin çalışma saatleri arasındaki dengesizlik ve fazla mesai süresi sosyal amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları dikkate alınarak rotalama kararlarının yanında alternatif bağlantılar arasından en uygun bağlantı ve hız seviyesinin seçilmesi kararı da bu modelde ele alınmıştır.

Literatürde amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre açık ARP, zaman pencereli ARP, çok depolu ARP, müşteri seçimi ile ARP, periyodik ARP gibi farklı türde ARP'ler bulunmaktadır [6]. Kim vd [8] ARP alanında geniş bir literatür taraması yapmışlardır. ARP ile ilgili çok geniş bir literatür olmasına rağmen biz burada bu çalışmayla ilgili olanlara yer verdik.

Y-ARP ya da kirlilik ARP'sinde çevresel amaç fonksiyonu dikkate alınır ve genellikle yakıt tüketiminin ya da CO<sub>2</sub> salınımının en küçüklenmesi amaçlanır. Cheng vd. [9] envanter rotalama probleminde karbon salınımını dikkate almışlardır. Toro vd. [10] yerleşim ve rotalama kararlarını birleştirerek iki amaçlı matematiksel model ile operasyonel maliyetleri ve çevresel etkileri en küçüklemeyi amaçlamışlardır. Xiao ve Konak [11] zaman bağımlı rotalama & çözelgeleme problemini CO<sub>2</sub> salınımı en iyilemesi amacıyla kesin dinamik programlama algoritması geliştirerek çözmüşlerdir. Xiao vd. [12] hız ve seyahat süresinin sürekli değer aldığı kirlilik rotalama problemini karma tam sayılı modele dönüştürerek ele almışlardır. Giallanza ve Puma [13] Y-ARP'de müşteri taleplerini bulanık olarak tanımlamışlardır. Ren vd. [14] elektrikli araçları da modele dahil ederek yakıt tüketimini en küçüklemeyi amaçlamışlardır.

Koç vd. [15] aracın boş ağırlığı ve taşıdığı yük miktarının yakıt tüketimindeki etkisini sadece yol uzunluğunu değil aracın hızını da dikkate alarak çalışmışlardır. Üç farklı tip araç kullanılmıştır ve amaç toplam yakıt ve sürücü maliyetinin en küçüklenmesidir. Kopfer vd. [2] heterojen filo ile yük ve yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Kısa rotanın her zaman en düşük yakıt tüketimini vermediği, kullanılan araç tipinin, aracın boş ağırlığının ve taşınan yük miktarının da yakıt tüketiminde etkili olduğunu göstermişlerdir. Yang vd. [16] çok amaçlı ARP'yi zaman penceresi ve farklı araç tiplerini dahil ederek ele almışlardır. Araç tipinin, hızın ve yük kapasitesinin dağıtım maliyeti, müşteri memnuniyeti ve çevresel kirliliği içeren amaç fonksiyonu değerlerini etkilediğini göstermişlerdir. Maden vd. [17] de farklı hız tercihlerinin yakıt tüketiminde ve rota

süresindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Franceschetti vd. [18] zaman bağımlı kirlilik rotalama problemini yakıt maliyeti ve sürücü ücretini en küçükleme amacıyla ele almışlardır. Niu vd. [19] yeşil açık ARP'yi Barth [20] 'ın önerdiği Bütünleşik Salınım Modelini (BSM) zaman penceresini dikkate alarak geliştirmişlerdir. Nosrati ve Khamseh [21] yakıt tüketimini ve seyahat süresini kısıtlara alırken uzaklığa göre indirim stratejisi uygulanan maliyet fonksiyonunu en küçükleme amaçlamışlardır.

Klasik ARP'nin NP-Zor olmasından dolayı literatürde bu tip problemleri çözmek için yaklaşım algoritmaları kullanılmıştır. Suzuki [22] aracın yükünü dikkate almış ve toplam yakıt tüketiminin en küçüklenmesini toplam uzaklığın da en küçüklenmesi ile birlikte ele almıştır. 10 noktadan büyük modellerin çözümü için yaklaşım algoritmasını kullanmıştır. Lai vd. [23] iki aşamalı melez meta-sezgisel algoritmayı zaman pencereli topla-dağıt rotalama problemi için kullanmışlardır. Demir vd. [24] uyarlanabilir büyük komşu arama sezgisel algoritmasını kirlilik rotalama problemi için geliştirmişlerdir. Demir vd. [25] uyarlanabilir değişken komşu arama sezgisel yöntemini yakıt tüketimi ve toplam zamanı içeren iki amaçlı kirlilik rotalama problemi için kullanmışlardır. Problemin çözümü için dört farklı çok amaçlı problem çözme yöntemi uygulamışlardır. Kumar vd. [26] de kendi kendine öğrenen parçacık sürü optimizasyonu yöntemini zaman pencereli çok amaçlı üretim ve kirlilik rotalama problemi için kullanmışlardır. Li vd. [27] yükleme planı, servis zamanı ve yük kapasite kısıtlarını içeren iki amaçlı ARP'yi genetik algoritma yöntemi ile çözmüşlerdir. Küçükaydın [28] değişken başlama zamanlı ARP'ni sütun türetme temelli mat-sezgisel yöntemlerle çözmüştür. Uçar vd. [29] hareketli müşterili ARP'ni farklı meta-sezgisel yöntemlerle çözmüşlerdir. Yukarıda belirtildiği gibi literatürde ARP'de çevresel ve finansal konuları dikkate alan birçok çalışma

mevcuttur. Fakat sosyal konular yönetsel mevzularda önemli rol oynamasına rağmen bu konulara literatürde çok fazla rastlanmamıştır. Anvari ve Türkay [30] tesis yerleşim probleminde ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri eş zamanlı olarak analiz etmişler ve sosyal hususların ağ tasarımının sürdürülebilirliğindeki önemini vurgulamışlardır. Eguia vd. [1] ARP'de çevresel ve sosyal konulara odaklanmışlardır. Sürücüler arasındaki iş yükünün dengelenmesi, çalışanların motivasyon ve verimlilikleri üzerindeki etkisinden dolayı lojistik firmaları için önemli bir konudur. Yöneticiler de bir çalışana fazla iş yüklenirken diğerlerinin iş yüklerinin az olmasını istemezler. Ayrıca sürücülerin uzun saatler boyunca çalışmaları da kazalara yol açabilmektedir. Yousefikhoshbakht vd. [31] rotadaki dengenin sürücülerin memnuniyetinde önemli olduğunu belirtmişlerdir. Halvorsen-Weare ve Savelsbergh [32] iki amaçlı karma kapasiteli genel rotalama problemini ele almışlardır. En düşük maliyetli rotaları ararken eş zamanlı olarak rotaların iş yükünün dengelenmesini de düşünmüşlerdir.

Firmalar aynı zamanda yasalara tabidir ve çalışma koşullarıyla ilgili bazı kısıtlamalar altında faaliyet göstermelidir. Örneğin bir lojistik firmasında sürücüler için belli aralıklarda molalar verilmelidir. Gagnon vd. [4] de molalarla ilgili düzenlemeleri dikkate alan zaman pencereli ARP'yi çözmek için geniş komşu arama sezgisel algoritmasını kullanmışlardır. Kok vd. [3] kısıtlı dinamik programlama sezgisel algoritmasını sürücülerin sürüş ve çalışma saatleriyle ilgili sosyal düzenlemeleri dikkate alan zaman pencereli ARP için kullanmışlardır.

Çalışmamızın literatürden farklılıklarını açıklamak için en ilgili çalışmalarla karşılaştırması Tablo 1'de sunulmuştur. Çalışmamızın katkısı esas olarak iki yönlüdür. İlk olarak, bildiğimiz kadarıyla bir ARP'yi finansal, çevresel ve sosyal

**Tablo 1.** Literatür Karşılaştırması (Literature Comparison)

	Çok Amaçlı Model	Çevresel Amaçlar	Sosyal Amaçlar	Hız Seçimi	Alternatif Bağlantı
Bu çalışmada	+	+	+	+	+
Garaix vd.(2010)	-	-	-	-	+
Niu vd. (2018)	-	+	-	-	-
Toro vd. (2017)	+	+	-	-	-
Cheng vd. (2016)	-	+	-	-	-
Halvorsen-Weare ve Savelsbergh (2016)	+	-	+	-	-
Yousefikhoshbakht vd. (2016)	-	-	+	-	-
Koulaeian vd. (2015)	-	-	+	-	-
Yang vd. (2015)	+	+	-	+	-
Demir vd. (2014)	+	+	-	+	-
Koc vd. (2014)	-	+	-	+	-
Eguia vd. (2013)	-	+	+	-	-
Franceschetti vd. (2013)	-	+	-	+	-
Kopfer vd. (2013)	-	+	-	-	-
Demir vd. (2012)	-	+	-	+	-
Kok vd. (2010)	-	-	+	-	-
Maden vd. (2010)	-	-	-	+	-

amaçları birlikte çok amaçlı bir ortamda analiz eden ilk çalışmadır. Bu çalışma kapsamında bahsettiğimiz amaç fonksiyonlarını içeren yeni bir matematiksel model ve ağırlıklı toplam yöntemine ek olarak yeni bir melez yöntemi çok amaçlı problemin ölçeklendirilmesi için önerdik. İkinci olarak; zaman, uzunluk ve maliyet açısından ödünleşmenin analiz edildiği noktalar arasında alternatif bağlantıları içeren matematiksel model geliştirilmiştir. Finansal, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşmenin beraberinde çoğunlukla gerçek hayattan veriler kullanılarak da ayrıntılı bir analiz yapılmıştır.

Bir sonraki bölümde model tanımı ve açıklaması verilmiştir. Ardından 3. Bölümde çok amaçlı çözüm için metodlar sunulmuştur. 4. Bölümde deneysel sonuçlar ve yorumlar verilmiştir ve 5. Bölüm ile çalışma sonlandırılmıştır.

## 2. PROBLEM TANIMI VE MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MODEL)

Depo noktasını da içeren belirli bir  $n$  talep noktası için noktalar arasında yönlendirilmiş bir serim tanımlanmıştır. Klasik araç rotalama problemlerinde bir çift  $i$  ve  $j$  düğümü arasında tek bir  $(i,j)$  ayrıtı tanımlanır. Fakat bizim çalışmamızda her  $i$  ve  $j$  düğümü arasında birden fazla bağlantı bulunmaktadır ve  $(i,j,k)$  gösterimi  $i$  ve  $j$  düğümü arasındaki  $k$ . bağlantı olarak tanımlanır. Her bağlantının uzunluğu  $d_{ijk}$  ile gösterilir.  $x_{ijk}$   $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantısı ile gidilirse 1, diğer durumlarda 0 değerini alan 0-1 değişkendir. Ayrıca her araç her bağlantı için  $n$  ile tanımlanmış farklı hız seviyelerinden birini seçebilir.  $v_{ijkn}$  değişkeni eğer araç  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantısı üzerinden  $n$ . hız seviyesi ile giderse 1. diğer durumlarda 0 değerini alır. Her ayrıtı türüne bağlı olarak ayrıtıların birbirinden farklı olması nedeniyle olası hız seviyeleri tanımlanmıştır. Araçlar otoban gibi yollarda yüksek hızlarda gidebilirken şehir içi gibi yollarda daha düşük hızlarda gidebilir. Fakat hızlı yollar daha uzun ya da daha maliyetli olabileceğinden bağlantı seçimi problemin parametrelerine, kısıtlarına ve amaçlarına bağlıdır. Farklı özelliklere sahip farklı bağlantılar olmasına rağmen bu özelliklerin zamana bağlı olmadığı varsayılmıştır. Zaman bağımlı hız seçimleri ve seyahat süreleri modele dahil edilebilir fakat karmaşık olan model daha da karmaşık hale geleceği ve çözümün elde edilmesi daha da zorlaşacağı için zaman bağımlı çalışmalar geleceğe bırakılmıştır.

Bu modelde her  $i$  talep noktasının  $q_i$  ile tanımlanan bir talep miktarı vardır ve bir talep düğümü ziyaret edilirse tek seferde tüm talep karşılanmalıdır. Bir diğer deyişle parçalı talebe izin verilmemektedir. Her biri sabit  $Q$  kapasitesine sahip homojen bir araç filosunun olduğu varsayılmıştır. Buna ek olarak modelimizde her  $i$  talep noktası için servisin başlangıç zamanının  $a_i$  ve  $b_i$  aralığında olmasını sağlayan zaman penceresi de tanımlanmıştır. Eğer araç  $a_i$  vaktinden önce talep noktasına varırsa zaman  $a_i$  olana kadar beklemelidir ve aracın talep noktasına varış zamanının  $b_i$  zamanını geçmesine izin verilmez.  $t_i$   $i$ . talep noktasındaki teslimat için harcanan zamanı gösterir.  $RT$  rota süresi için izin verilen

zamanı tanımlar. Eğer toplam zaman  $RT$  süresini geçerse fazla mesai ve fazla mesai ücreti ortaya çıkar. Modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri aşağıda tanımlanmıştır.

*İndisler:*

- $i, j$  : talep noktaları indisi,
- $k$  : iki nokta arasındaki alternatif yol indisleri,
- $n$  : alternatif yollar üzerindeki farklı hız indisleri,

*Kümeler:*

- $N$  =  $(0, \dots, N)$  Düğümler kümesi, 0 depo,
- $N0$  =  $N \setminus \{0\}$ , Talep noktaları kümesi,
- $Nh$  = 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,
- $f_v$  : kullanılan araç başına maliyet,
- $f_d$  : birim zamanda fazla mesai ücreti,
- $f_s$  : birim zamanda normal mesai ücreti,
- $f_e$  : Rota süreleri arasındaki farktan meydana gelen sosyal maliyet,
- $f_a$  : Birim başına düşen fazla mesainin sosyal maliyeti,
- $f_b$  : CO<sub>2</sub> salınım miktarı (kg/lt),
- $f_c$  : Yakıt tüketim maliyeti (TL/sn)
- $d_{ijk}$  :  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  seviyesindeki uzaklık,
- $S_{ijkn}$  :  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantısındaki  $n$  hız seviyesi,
- $RT$  : İzin verilen rota süresi

*Karar Değişkenleri:*

- $x_{ijk}$  :  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantı ile gidilirse 1. d.d. 0,
- $v_{ijkn}$  :  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantısı ve  $n$  hız seviyesi ile gidilirse 1, d.d. 0,
- $f_{ijk}$  :  $i$  noktasından  $j$  noktasına  $k$  bağlantısı ile taşınan yük miktarı,
- $y_i$  :  $i$  noktasında servisin başlama zamanı,
- $s_j$  :  $j$  noktası rotanın son noktası olduğu durumda rotanın toplam zamanı,
- $o_j$  : Rota süresinin aşıldığı miktar (fazla mesai),
- $e_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  noktaları farklı iki rotanın son noktası olduğu durumda rota süreleri arasındaki fark,
- $Z$  : Amaç fonksiyonu

Yakıt tüketim miktarının aracın hızına bağlı olduğu kadar aracın yüküne ve diğer faktörlere de bağlı olduğu

bilinmektedir. Yakıt tüketimi ve gaz salınımı Barth vd. [20] tarafından geliştirilen BSM kullanılarak hesaplanır. BSM aracın belirli iki nokta arasında hızının sabit olduğunu varsayar. Turkensteen [33] yeşil araç rotalamada yakıt tüketimi ve gaz salınımının doğruluğunu analiz etmiştir. Hız dalgalanmaları ve gerçek hayattaki sürüş koşullarının sonuçlara etkisinin olduğu görülse de BSM literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yakıt tüketimini gerçekçi sürüş koşulları altında iyi tahmin etmektedir. Literatürde yaygın bir yaklaşım olan kesin tüketim değerlerine yakın olarak araçların herhangi iki düğüm arasında sabit bir hızla seyrettiği varsayımına dayanarak ortalama bir hız değeri kullanılır. Demir vd. [24] BSM'yi kullanarak yakıt tüketiminin hız ve yük arasındaki ilişkisini göstermişlerdir. Yakıt tüketimi denklemini hız, yük ve diğer etkenlere bağlı olarak Eş. 1 ile hesaplamışlardır.

$$f(v) = \lambda(kNV + w\gamma av + \gamma afv + \beta\gamma v^3) \frac{d}{v} \quad (1)$$

Yukarıdaki (1) numaralı denklemde  $v$  hızı,  $d$  uzaklığı,  $f$  taşınan yük miktarını ifade eder. Ek olarak  $\lambda = \xi/k\psi$ ,  $\gamma = \frac{1}{1000}n_{tf}\eta$ , sabit değerlerdir;  $\alpha = \tau + g\sin\theta + gC_r\cos\theta$  ve  $\beta = 0,5 C_d\rho A$  değerleri de araca özgü sabitlerdir ve Tablo 2'de verilen değerler kullanılarak hesaplanır. Tablo 2'deki değerlerin çoğu Demir vd. [24]'den elde edilmiştir. İvme ve yoldaki açının değerleri sıfır kabul edilmiştir.

Yukarıdaki tabloda verilen sabitler ve bu modeldeki karar değişkenleri kullanıldığında litre cinsinden yakıt tüketimi Eş. 2 ile hesaplanır:

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

Amaç fonksiyonunda finansal, çevresel ve sosyal maliyetler dikkate alınmıştır. Yakıt tüketiminin maliyeti ( $f_cFC$ ), sürücü/araç için normal mesai ve fazla mesai maliyeti ( $f_s \sum_j s_j + f_d \sum_j o_j$ ), kullanılan araç/sürücü sayısı için sabit maliyet ( $f_v \sum_{j \in NO} x_{0jk}$ ) finansal amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Yakıt tüketimi miktarı litre başına CO<sub>2</sub> salınım miktarı olarak tanımlandığından dolayı çevresel maliyet  $f_b$  ile çarpılarak elde edilir. Böylece  $f_bFC$  çevresel amaç fonksiyonu olarak ele alınır. Sosyal amaç fonksiyonu için, öncelikle sosyal olarak istenmeyen, sürücülerin fazla mesai maliyeti dikkate alınır. Sürücülerin çalışma saatleri arttığında daha yorgun oldukları için yolda kaza riski de artmaktadır. Buna ek olarak, bazı ülkelerdeki sürüş saatleri düzenlemesi gereği rota saatlerinde belirli kısıtlar uygulanır. Modelimizde rota süreleri sıkı kısıtlar olarak ele alınmamasına rağmen belirli bir süre aşıldığında aşılacak sürenin ceza katsayısı ile çarpımı amaç fonksiyonunda yer alır. Böylelikle sürücüler için mümkün olduğunca fazla mesai süresinin azaltılması amaçlanır. Ek olarak farklı sürücüler arasındaki rota sürelerinin dengeli olması istenmektedir. Dengesiz çalışma saatleri sürücüler ve şirket arasında sorunlara yol açabilir. Bazen de sürücülere hizmetlerinin süresine göre ücret ödenir ve diğerlerine göre daha az sürüş saati tahsis edilmiş olan sürücüler yöneticilerin adaletinden şikayet etme eğiliminde olabilirler.

**Tablo 2.** Modelde kullanılan parametreler ve değerleri (Parameters used in the model and their values)

Gösterim	Tanım	Değer
W	Yüksüz Araç Ağırlığı (kg)	6350
$\xi$	Hava Kütlesi Yakıt Oranı	1
k	Motor Sürtünme Faktörü (kilojul/devir/litre)	0,2
N	Motor Hızı (devir/sec)	33
V	Motor Hacmi (lt)	5
g	Yerçekimi Sabiti (metre/sec <sup>2</sup> )	9,81
$C_d$	Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı	0,7
$\rho$	Hava Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,2041
A	Araç Ön Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	3,912
$C_r$	Yuvarlanma Mesafesi Katsayısı	0,01
$n_{tf}$	Araç Sürüş Verimi	0,4
n	Dizel Araçlar İçin Verimlilik Parametresi	0,9
$f_b$	CO <sub>2</sub> salınımı (kg)	2,67
$f_c$	Yakıt Tüketimi Maliyeti (TL/sec)	5,81
$f_a$	Sosyal Amaç Katkısı	0,025
$f_d$	Fazla Mesai Sürücü Ücreti (TL/sec)	0,0124
$f_s$	Normal Mesai Sürücü Ücreti (TL/sec)	0,0062
$f_v$	Araç Maliyeti (TL)	200
Q	Araç Kapasitesi (kg)	5500
$\kappa$	Dizel Yakıtlar İçin Isıtma Değeri (kilojul/gr)	44
$\Psi$	Çevrim Faktörü (gram/saniye'den litre/saniye)	737
$\tau$	İvme	0
$\theta$	Yol Açısı	0

Bu nedenle rota sürelerinin mümkün olduğunca birbirine yakın olması amaçlanmıştır. İki farklı rotadaki son noktalar olan  $i$  ve  $j$  noktalarının rota süreleri arasındaki fark  $e_{ij}$  değişkeni ile hesaplanır. Bu değerler sosyal maliyet faktörüyle çarpılarak sosyal amaç fonksiyonuna eklenir. Sonuç olarak fazla mesai maliyeti ve dengelenmemiş rota süresinin maliyeti  $(f_a \sum_j o_j + f_e \sum_{i,j} e_{ij})$  sosyal amaç fonksiyonu olarak dikkate alınır. Böylece model Eş. 3-Eş. 20'deki gibi çok amaçlı olarak ele alınmıştır.

*Amaç Fonksiyonu:*

$$\text{Enk } Z_f = f_c FC + f_s \sum_j s_j + f_d \sum_j o_j + f_v \sum_{j \in N_0} x_{0jk} \quad (3)$$

$$\text{Enk } Z_e = f_b FC \quad (4)$$

$$\text{Enk } Z_s = f_a \sum_j o_j + f_e \sum_{i,j} e_{ij} \quad (5)$$

*Kısıtlar:*

$$\sum_{j \in N, k \in K} x_{0jk} \leq m \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N, k \in K} x_{ijk} = 1, \forall i \in N_0 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N, k \in K} x_{ijk} = 1, \forall j \in N_0 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N, k \in K} f_{jik} - \sum_{j \in N, k \in K} f_{ijk} = q_i, \forall i \in N_0 \quad (9)$$

$$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (Q - q_i) x_{ijk}, \forall (i, j) \in \mathcal{A}, k \in K \quad (10)$$

$$y_i - y_j + t_i + \sum_{n \in N_h} d_{ijkn} v_{ijkn} / S_{ijkn} \leq M(1 - x_{ijk}), \forall i \in N, \forall j \in N_0, i \neq j \quad (11)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{n \in N_h} d_{j0k} v_{j0kn} / S_{j0kn} \leq M(1 - x_{j0k}), \forall j \in N_0 \quad (12)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i, \forall i \in N_0 \quad (13)$$

$$\sum_{n \in N_h} v_{ijkn} = x_{ijk}, \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (14)$$

$$o_j \geq (s_j - RT), \forall j \in N \quad (15)$$

$$s_i - s_j \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{j0k}), \forall (i, j) \in N_0 \quad (16)$$

$$s_j - s_i \leq e_{i,j} + M(1 - \sum_k x_{i0k}), \forall (i, j) \in N_0 \quad (17)$$

$$f_{ijk} \geq 0, \forall (i, j) \in \mathcal{A}, k \in K \quad (18)$$

$$y_i \geq 0, \forall i \in N \quad (19)$$

$$o_j \geq 0, \forall j \in N_0 \quad (20)$$

Amaç fonksiyonları finansal, çevresel ve sosyal amaçları içermektedir. Amaç (Eş. 3) finansal maliyet olarak yakıt maliyetini, normal mesai ve fazla mesai ücretini ve sabit araç kullanım maliyetini; amaç (Eş. 4) çevresel maliyet olarak CO<sub>2</sub> salınım miktarını ve amaç (Eş. 5) sosyal maliyet olarak

fazla mesai maliyetini ve dengesiz rota süreleri maliyetini içerir.

(Eş. 6, Eş. 7 ve Eş. 8) numaralı kısıtlar araçların depodan çıkmasını, depoya geri dönmesini ve her düğüme sadece bir defa uğramasını sağlar. (Eş. 9 ve Eş. 10) numaralı kısıtlar taşınan yük miktarını hesaplar ve her müşterinin talebinin karşılanmasını sağlar. (Eş. 11 ve Eş. 12) sırasıyla servis zamanı ve rota süresini hesaplar. (Eş. 13) zaman penceresi kısıtlarını sağlar. (Eş. 14) her ayrıtta bir hız seviyesinin seçilmesini sağlar. (Eş. 15) aşılın rota süresini hesaplar. (Eş. 16 ve Eş. 17) rota süreleri arasındaki farkı hesaplar. (Eş. 18, Eş. 19 ve Eş. 20) pozitif işaretli olma kısıtlarıdır.

### 3. ÇOK AMAÇLI PROBLEM ÇÖZME YÖNTEMLERİ

(MULTI-OBJECTIVE PROBLEM SOLVING METHODS)

Bölüm 2'de bahsedilen çok amaçlı problemi çözmek için çok amaçlı problemi tek bir amaç fonksiyonuna çeviren gerçek değerli ölçeklendirme fonksiyonu kullanılmıştır. Demir vd. [25]'de olduğu gibi literatürde yaygın kullanılan yöntemlerden ağırlıklı toplam ve  $\epsilon$ -kısıt metodu skalerleştirme yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu iki yöntem Pareto optimal sonuçları belirlemek için aşağıda açıklandığı gibi kullanılmıştır.

#### 3.1. Ağırlıklı Toplam Metodu (Weighted Sum Method)

Bu methodda her amaç fonksiyonuna bir ağırlık atanır ve ağırlıklı amaç fonksiyonları toplamı en küçüklenir. Aşağıdaki problemde Eş. 21'de ifade edilen amaç fonksiyonunda  $w_f$  finansal faktörün ağırlığı,  $w_e$  çevresel faktörün ağırlığını,  $w_s$  sosyal faktörün ağırlığını ifade eder.

$$\text{Enk } w_f Z_f + w_e Z_e + w_s Z_s \quad (21)$$

(6)- (20) kısıtları altında

Yukarıdaki modelde çok amaçlı probleme farklı pareto optimal çözümler elde etmek için farklı ağırlıklar kullanılmıştır. Ayrıca bu faktörlerin önemini yansıtabilecek çözümler elde etmek için daha önemli amaçlara daha yüksek ağırlıklar verilebilir.

#### 3.2. Ağırlıklı Toplam Metoduyla Melezlenmiş $\epsilon$ -Kısıt Metodu

( $\epsilon$ -Constraint Method with The Weighted Sum Method)

Finansal, çevresel ve sosyal maliyet faktörleri arasındaki ödünleşimi daha iyi analiz etmek amacıyla ağırlıklı toplam metodu  $\epsilon$ -kısıt metoduyla melezlenmiştir. Geleneksel  $\epsilon$ -kısıt metodunda bir amaç en iyilenirken diğer amaçlar temel gereklilikleri sağlayacak şekilde kısıt olarak eklenir. (Eş. 22)

$$\text{Enk } f_j(x) \quad (22)$$

$$f_i(x) \leq e_i \quad \forall i=1,2,\dots,p; i \neq j$$

$$x \in S$$

Eş. 22’de  $f_i(x)$   $i$ . amaç fonksiyonunu,  $p$  ise amaç fonksiyonlarının sayısını,  $S$  çözüm uzayını,  $x$  karar vektörünü ifade eder. Yukarıdaki modelde  $e_i$ ,  $f_i$  amaç fonksiyonu için izin verilen en büyük değerdir ve pareto optimal çözümleri elde etmek amacıyla kademeli olarak azaltılır. Ancak çok sayıda amaç fonksiyonu aynı anda kısıt olarak ele alındığında  $e_i$  değerlerinin olası kombinasyonları üstel artmakta ve problemin analiz edilmesi güçleşmektedir.

Bizim modelimizde üç farklı amaç fonksiyonu olması nedeniyle geleneksel  $\epsilon$ -kısıt metoduyla ağırlıklı toplam metodunu melezleyen yeni bir değişiklik önerilmiştir. Maliyet faktörlerinin biri kısıt olarak eklenirken geri kalan iki maliyet faktörü ağırlıklarıyla çarpılarak amaç fonksiyonunda tutulur. Sonuç olarak model Eş. 23’de ifade edildiği hale dönüşür:

$$\text{Enk } \sum_{i=1, i \neq j}^p w_i f_i(x) \quad (23)$$

k.a.  
 $f_j(x) \leq e_j$   
 $x \in S$

Yukarıdaki modelde kısıt kümesine alınan maliyet faktörü ilgilenilen ana faktördür ve bir sınır dahilinde sağ tarafındaki değer değiştirilerek çözümün nasıl değiştiği gözlemlenebilir. Kısıt kümesindeki  $e_j$  maliyet faktörüne göre amaç fonksiyonunun iki boyutlu grafikleri de çizilir.

Finansal, çevresel ve sosyal maliyet faktörleri arasındaki ödünleşimi analiz etmek amacıyla Sosyal Model ve Çevresel Model olmak üzere sırasıyla sosyal maliyeti ve çevresel maliyeti kısıt olarak ele alan iki model ele alınmıştır. Kısıtlamaların sağ tarafındaki değeri değiştirerek her durumda amaç fonksiyonunun nasıl değiştiği analiz edilir ve bu maliyet faktörleri arasındaki ödünleşim gözlemlenir.

#### Sosyal Kısıtlı Model:

Bu modelde sosyal maliyet faktörü ile diğer maliyet faktörleri arasındaki ödünleşimi analiz etmek için finansal ve çevresel maliyetler amaç fonksiyonunda yer alırken sosyal maliyet faktörü kısıtlar arasında yer alır. Model Eş. 24’de ki eşitliklerle ifade edildiği hale gelir:

$$\text{Enk } w_f Z_f + w_e Z_e \quad (24)$$

k.a.  
 $Z_s \leq K$

(Eş. 6-Eş. 20) kısıtları dahil olmak üzere.

Sağ taraftaki  $K$  değerinin değişimine göre sosyal maliyet ana ilgi odağı olduğunda ve firma sosyal maliyetin belirli bir eşikten fazla olmasına izin vermediğinde finansal ve çevresel maliyetlerin nasıl etkilendiğini analiz edebiliriz.

#### Çevresel Kısıtlı Model:

İkinci bir durum olarak çevresel faktörlere karşı finansal ve sosyal maliyet faktörlerini analiz etmek için Eş. 25 ile ifade edilen model ele alınmıştır.

$$\text{Enk } w_f Z_f + w_s Z_s \quad (25)$$

k.a.  
 $Z_e \leq K$

(Eş. 6-Eş. 20) kısıtları dahil olmak üzere.

Bu modelde izin verilen en büyük çevresel maliyet kısıtlamalarda tanımlanmıştır ve şirketin bu kararı verirken izin verilen çevresel etkiyi aşmaması gerekir.

## 4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde yukarıda açıklanan modelin farklı parametreler ile elde edilen sonuçları verilmektedir. Bu bölümdeki sonuçlar GAMS Cplex çözücüsü ile Intel(R) Xeon (R) CPU E5\_1650 v2 @3,50 GHz ve 16,0 GB RAM’e sahip bir bilgisayar ile elde edilmiştir. İlk olarak 3 müşterili bir örnek üzerinden amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim analiz edilmiştir. Ardından 10, 15, 20 ve 50 müşterili olarak çoğunlukla gerçek hayat verilerinin kullanıldığı örnekleri sunulmuştur.

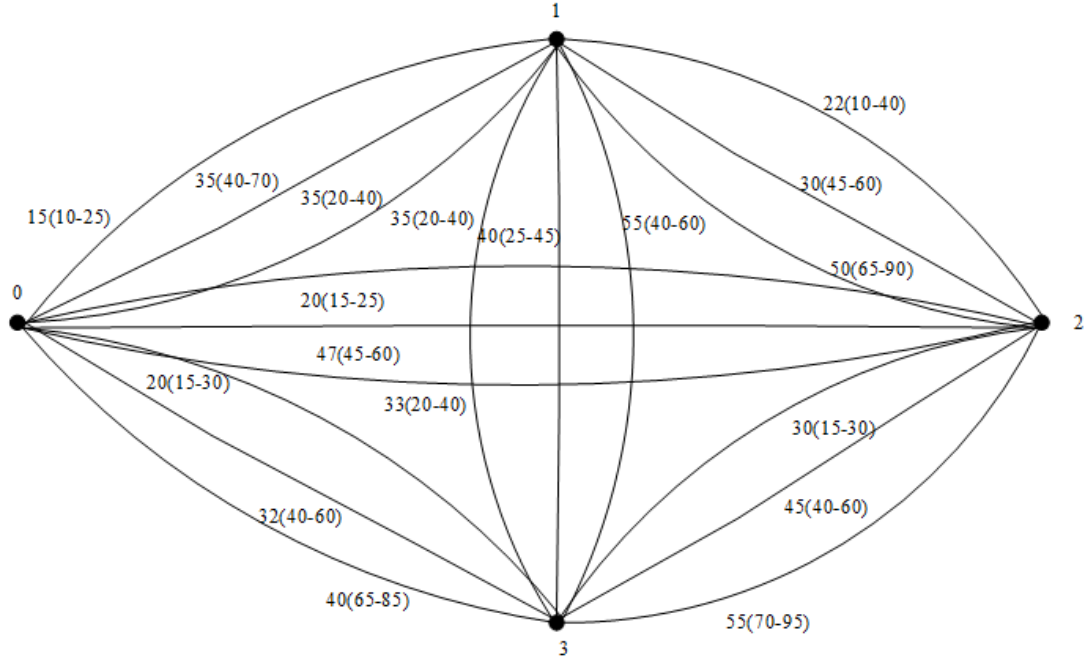
### 4.1. 3 Düğümlü Oyuncak Dağıtım Problemi (A Toy Distribution Example with 3 Nodes)

Bu örnek için talepleri sırasıyla 200, 400 ve 300 kg olan 3 talep noktasına sahip Şekil 1’de verilen serim kullanılmıştır. Her ayrıttaki ilk değer ayrıttın kilometre cinsinden uzunluğunu ve parantez içerisindeki iki değer o ayrıtt için seçilebilecek farklı hız düzeylerini km/sa cinsinden verir. Ayrıca Tablo 2’de verilen gerçek hayat verilerine ek olarak tüm  $i$  düğümleri için  $RT=9$  saat,  $t_i= 20$  dakika (her  $i$  noktası için) ve  $f_a=1,5$  TL/dk olarak kabul edilmiştir. Aşağıda açıklandığı gibi farklı senaryolar değerlendirilerek her senaryonun sonuçları tüm ağırlıklar 1’e eşit olan ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak Şekil 2 ve Tablo 3’te sunulmuştur.

*Senaryo A:* Bu senaryoda her nokta için en erken servis başlama zamanı 0 ve en geç servis başlama zamanı 10 saat olmak üzere esnek zaman pencere değerleri kullanılmıştır. Bu durum için seçilen en uygun rota, seçilen bağlantılar ve hız seviyeleri Şekil 2a bölümünde verilmiştir.

*Senaryo B:* Bu senaryoda düğümlerin en erken ve en geç servise başlama zamanları için sırasıyla 1. düğüm için 0-0,6, 2. düğüm için 0-1,6, 3. düğüm için 0-2,5 saatleri olmak üzere sıkı zaman pencere değerleri kullanılmıştır. Şekil 2b’de verilen sıkı zaman penceresinin sonuçlarına bakıldığında müşterilere uğrama sırasının değişmediği, daha uzun olmasına rağmen daha yüksek hızla gidilebilen ayrıttların seçildiği görülmüştür. 3. düğümden depoya giderken bir zaman penceresi olmadığı için modelin maliyeti artıracak daha hızlı bir yolu seçmeye ihtiyacı yoktur. Bu nedenle seçilen ayrıtt değişmemiştir. Tablo 3’te görüldüğü gibi senaryo a ile kıyaslandığında toplam rota uzunluğunun arttığı fakat toplam rota süresinin azaldığı görülmüştür.





Şekil 1. Üç talep noktalı ağ örneği (Network with 3 demand nodes)

*Senaryo C:* Bu durumda senaryo b ile aynı zaman penceresi değerleri kullanılmıştır fakat normal mesai 2 saat olarak alınmıştır. Bu senaryonun sonuçlarına bakıldığında fazla mesai maliyetinin yüksek olmaması için modelin daha hızlı bağlantıları seçtiği gözlemlenmiştir. Senaryo b'den farklı olarak 3. düğümden depoya dönerken daha hızlı gidebileceği ayrıtı seçtiği görülmüştür. Ancak modelin toplam rota süresi 2 saatten fazla olmasına rağmen en hızlı bağlantıların maliyeti fazla mesai maliyetinden yüksek olduğu için en hızlı bağlantıların seçilmediği görülmüştür.

*Senaryo D:* Bu senaryoda  $f_a$  değerinin 2 ile çarpılması dışında tüm değerler senaryo c ile aynıdır. Bu senaryonun sonucuna bakıldığında modelin senaryo c'de seçtiğinden daha yüksek hız seviyelerini seçtiği görülmüştür. Çünkü burada sosyal maliyet daha yüksektir ve daha hızlı bağlantıyı seçmenin maliyeti fazla mesai maliyetinden yüksek değildir. Senaryo c ve senaryo d'nin sonucu olarak bir şirket için sosyal kaygılar daha önemli hale gelirse (çalışma saatleri gibi) buna göre çalışma saatlerinde de değişikliğe gidilmelidir.

*Senaryo E:* Bu senaryoda senaryo b ile aynı zaman penceresi değerleri kullanılmıştır. Fakat fazla mesai ücreti  $f_a$  10 ile çarpılmıştır ve normal mesai süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Bu senaryonun sonucunda fazla mesai maliyeti daha önemli hale geldiğinden Şekil 2e'de görüldüğü gibi 3 rota oluşturulmuştur. Bu durumda normal mesai sınırı aşılmadan senaryo d ile kıyaslandığında model daha düşük toplam mesafeli ve daha az yakıt tüketimi olan bir çözüm oluşturmuştur. Fakat 3 rotaya 3 farklı araç kullanıldığı için daha yüksek bir finansal maliyet elde edilmiştir.

*Senaryo F:* Bu senaryoda esnek zaman penceresi kullanılmış ve normal mesai süresi 3 saat olarak belirlenmiştir. Bu senaryonun sonucu senaryo a ile kıyaslandığında Tablo 3'te görüldüğü üzere toplam rota uzunluğunun daha yüksek olmasına rağmen toplam rota süresinin azaldığı görülmüştür.

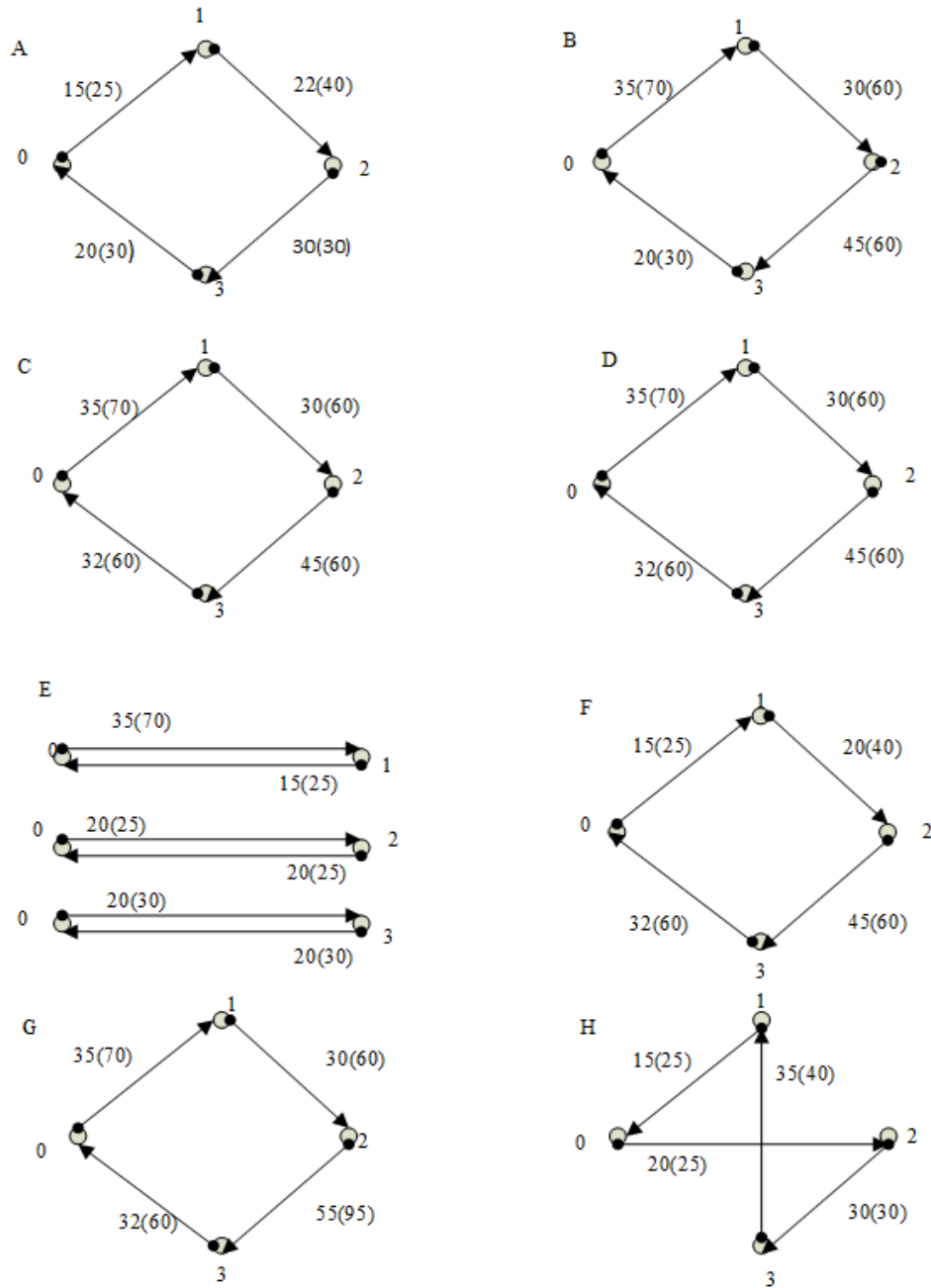
*Senaryo G:* Bu senaryoda da esnek zaman penceresi değerleri kullanılmış, normal mesai süresi 3 saat olarak belirlenmiştir ve  $f_a$  2 ile çarpılmıştır. Bu senaryonun sonucunda model rota süresini aşmamak için daha yüksek hız seviyelerini seçer. Tablo 3'te görüldüğü gibi senaryo f ile kıyaslandığında daha hızlı ancak daha uzun bir rota seçilmiştir.

*Senaryo H:* Esnek zaman penceresi değerleri bu durumda da kullanılmıştır. Fakat 1 ve 2 düğümleri arasındaki hız seviyeleri 10'a bölünerek yoğun trafik durumu uygulanmaya çalışılmıştır. Bunun sonucu olarak modelin rotayı değiştirdiği ve maliyetlerin biraz daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Senaryo sonuçlarına bakıldığında en uygun rotanın problem parametrelerine bağlı olduğu ve hatta optimal rota aynı olsa da bu rotalardaki alternatif bağlantıların seçiminin maliyeti önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca finansal, çevresel ve sosyal maliyet faktörlerinin de optimal rotanın belirlenmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

#### 4.2. 10 Düğümlü Örnekler (Case Studies with 10 Nodes)

Bu örnek olayda Türkiye'de farklı yerlerde müşterileri bulunan ve ürünlerin istenilen zaman aralıklarında teslim edilmesi gereken bir lojistik firması değerlendirilmiştir.



13

Şekil 2. 3 talep noktalı senaryo sonuçları (Results of scenarios with 3 customers)

İlk olarak 10 düğümlü, ardından 15,20 ve 50 düğümlü örnekler incelenmiştir. Tüm modellerde önceki bölümde olduğu gibi Tablo 2’de verilen parametreler kullanılmıştır.

#### 4.2.1. 10 düğümlü senaryolar (Scenarios for 10 nodes)

10 düğümlü örnek için sırasıyla 1’den 10. müşteriye kadar talepler 450, 650, 800, 550, 700, 550, 500, 650, 850 ve 900 kilogramdır. Her müşteri için kullanılan zaman penceresi değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 5’in ilk satırında temel senaryonun sonuçları verilmiştir. Bazı model

parametrelerinde duyarlılık analizi uygulamak amacıyla değişiklik yapılmıştır. Temel senaryo üzerinde yapılan değişiklikler ve sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 5’in ikinci ve üçüncü satırlarında zaman penceresi değerlerinin etkileri analiz edilmiştir, dördüncü ve beşinci satırlarında normal mesai süresi değiştirilmiştir ve diğer satırlarda farklı maliyet ağırlıklarının sonuçlar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Esnek zaman penceresinde en erken servise başlama zamanı 0, en geç servise başlama zamanı 10 olarak kabul edilmiştir. Sıkı zaman penceresi değerleri de temel durum değerlerinden daha sıkı değerlerdir.

**Tablo 3.** 3 talep noktalı örneğin sonuçları (Results of instances with 3 customers)

Senaryo	Toplam Uzunluk (km)	Rota Süresi (h)	Fazla Mesai (h)	Yakıt Tüketimi (lt)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)
A	87	3,89	0	16,47	0	382,70	43,98	426,68
B	130	3,48	0	21,32	0	401,66	56,91	458,57
C	142	3,35	1,35	22,46	121,42	465,46	59,96	646,84
D	152	3,17	1,17	25,83	211,16	473,28	68,97	753,41
E	130	1,47	0	24,77	11,48	858,87	66,14	936,49
		1,98	0					
		1,71	0					
F	114	3,5	0,5	18,91	45,31	410,51	50,48	506,29
G	152	3,17	0,17	25,82	31,16	428,58	68,95	528,69
H	100	4,37	0	19,06	0	408,29	50,90	459,19

**Tablo 4.** Müşteriler için temel durum zaman penceresi değerleri (Base case time window values for the customers)

Müşteri	$a_i$ (h)	$b_i$ (h)	Müşteri	$a_i$ (h)	$b_i$ (h)
1	0	3	6	2	6
2	1,5	5	7	5	9
3	2	5	8	4	8
4	3	7	9	6	10
5	4	8	10	1	5

**Tablo 5.** 10 düğümlü modelin sonuçları (Results of models with 10 customers)

N=10	Toplam Uzunluk (km)	Rota Süresi (h)	Fazla Mesai (h)	Yakıt Tüketimi (l)	Sosyal Maliyet (tl)	Finansal Maliyet (tl)	Çevresel Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)
Temel Durum	419,96	6,9	0	70,79	3,08	1149,13	189,00	1341,21
Esnek Zaman Penceresi	366,87	8,1	0	62,90	12,92	1008,80	167,93	1189,65
Sıkı Zaman Penceresi	465,28	7,9	0	80,66	2,29	1241,20	215,35	1458,84
$RT=8$	433,02	6,9	0	73,84	2,14	1158,30	197,16	1357,60
$RT=6$	420,73	8,49	2,49	73,45	235,14	1265,04	196,10	1696,28
$RT=6$ ve $f_d=3$	420,73	8,49	2,49	73,45	464,28	1265,04	196,10	1925,42
$RT=6$ ve $f_d=6$	540,23	6,05	0,05	96,64	165,07	1912,92	258,03	2336,02
$RT=6$ , $f_d=6$ , ve $f_s=0,744$	544,57	6,12	0,12	98,01	162,57	2219,23	261,69	2643,50
		7,65	1,65					

Tablo 5'in ilk satırına bakıldığında modelin temel durumda normal mesai süresini aşmamak için dengeli bir rota oluşturduğu ve sosyal maliyetin diğer maliyetler ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğu görülmüştür. Zaman penceresi değerleri esnetildiğinde yakıt tüketimini azaltmak amacıyla sosyal maliyet artmıştır ve daha düşük bir toplam maliyet elde edilmiştir, ancak dengesiz rota süreleri ortaya çıkmıştır. Sosyal maliyetin ağırlığı artırıldığında model daha dengeli rota süreleri vermiştir fakat yakıt tüketimi ile finansal ve çevresel maliyetler artmıştır. Normal mesai

süresi azaltıldığında ( $RT=6$  veya  $RT=8$ ) modelin fazla mesai maliyetini artırmamak için rota sürelerini azalttığı ve daha dengeli rota sürelerinin elde edildiği görülmüştür. Rota süreleri normal mesai süresinden daha uzun hale geldiğinde sosyal maliyet önemli ölçüde artmaktadır ve sosyal maliyeti diğer maliyet faktörleriyle dengelemek daha elverişli hale gelmektedir. Fazla mesai ücreti ( $f_d$ ) artırıldığında model rota sürelerini azaltmak amacıyla daha hızlı yolları seçer, böylece yakıt tüketimi de artar. Benzer durum normal mesai ücreti artırıldığında da ortaya çıkar.

#### 4.2.2. 10 düğümlü örnek için melezlenmiş metod sonuçları (Results of hybrid method for 10 customers)

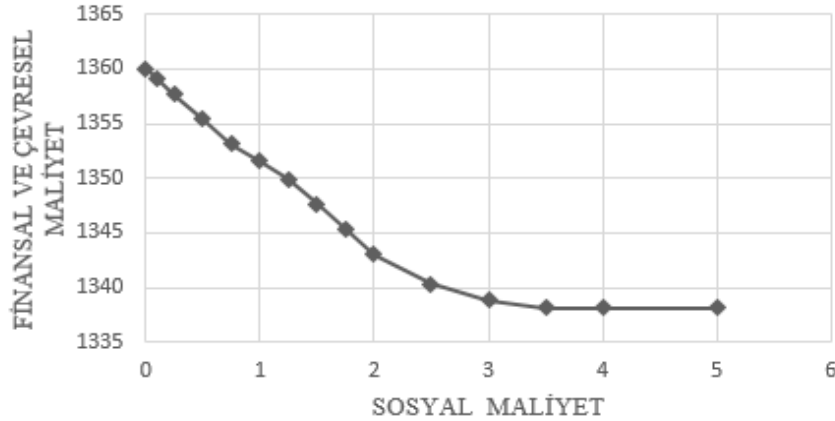
Bu bölümde, bölüm 3.2’de açıklanan ağırlıklı toplam metoduyla melezlenmiş  $\epsilon$ -kısıt yöntemiyle elde edilen sonuçlar verilmiştir. İlk olarak Sosyal model kullanılmıştır. Sosyal maliyet kısıt olarak ele alınmıştır ve sosyal maliyet faktörünün üst sınır değeri değiştirilerek sonuçlar analiz edilmiştir. Şekil 3’te bu modelin pareto sınırı sunulmuştur. Rota süresini aşmadan dengeli rotalar elde etmek için düşük sosyal maliyet değeri hedeflendiğinde finansal ve çevresel maliyetlerin artması gerekir. Beklendiği gibi sosyal maliyet değeri esnetildiğinde daha düşük finansal ve çevresel maliyetler elde edilmiştir.

Ancak unutulmamalıdır ki sosyal maliyetteki önemli derecede azalma finansal ve çevresel maliyetlerde küçük bir yüzde artış meydana getirir. Örneğin, sosyal maliyet ihmal edildiğinde finansal ve çevresel maliyetin toplam en iyi değeri 1337’dir, ancak sosyal maliyet %50 azalırken finansal ve çevresel maliyetin toplamı %1’den daha az artmıştır. Bu nedenle sosyal maliyetleri göz ardı etmek yerine bu amaç fonksiyonlarının aynı anda değerlendirilmesi çok daha iyi ve dengeli sonuçlara yol açar.

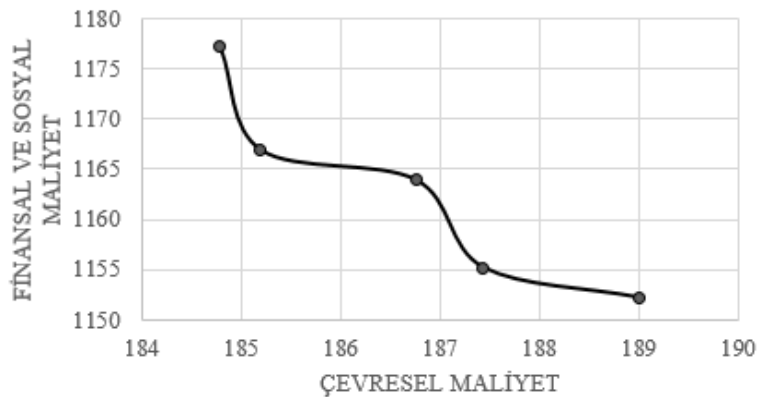
Daha sonra Çevresel Model kullanılarak çevresel maliyet değerlerindeki değişim analiz edilmiştir. Bu modelin çözümleri için Pareto sınırının gösterildiği Şekil 4’te görüldüğü üzere çevresel maliyeti azaltmak için diğer maliyetlerin artması gerekir. Daha dengeli sonuçlar elde etmek için diğer maliyetlerdeki küçük artışlarla çevresel maliyetin azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çevresel kısıtlamalar gittikçe daha da sıklaştığında bu tür maliyetleri karşılamak için finansal ve sosyal maliyetlerin önemli ölçüde artması beklenir.

#### 4.3. Büyük Boyutta Düşüm İçeren Senaryolar (Scenarios with Larger Number of Customers)

Daha fazla sayıda müşteriyi dikkate alan düğüm sayısı  $N=15$ , 20 ve 50 olan örnekler Tablo 6’da sunulmuştur. En iyi çözümler GAMS 23.8 içerisindeki Cplex çözücüsü ile elde edilmiştir. Küçük boyutlu örneklerde en iyi çözümler elde edilebilmiş, fakat büyük boyutlu örneklerde model 6 saat çalıştırılmış ve en iyi çözümün bulunamadığı durumlarda 6 saat sonunda GAMS içerisinde elde edilen en iyi uygun çözümler kullanılmıştır. Alt limit değerine yakınlık oranlarını belirlemek için de bulunan en iyi uygun çözüm değerleri, modelin GAMS tarafından bulunan alt limit değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Sosyal modelin sonuçları (Results of social model)



Şekil 4. Çevresel modelin sonuçları (Results of environmental model)

**Tablo 6.** Büyük boyutta düğüm içeren modellerin sonuçları (Results of models with larger number of customers)

	Sosyal Maliyet (TL)	Finansal Maliyet (TL)	Çevresel Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)	Alt Limit Değerine Yakınlık (%)	CPU Süresi (s)
<i>N=15</i>						
Temel Durum	2,05	1015,10	142,62	1159,77	0	2784
Esnek Zaman Penceresi	0,77	828,60	100,56	929,93	%7,25	21600
Sıkı Zaman Penceresi (SZP)	5,37	1114,94	186,68	1306,99	0	128
SZP, $f_c=11,6$	5,55	1520,78	186,04	1712,36	0	87
SZP, $Q=2750$	20,42	1821,93	206,01	2048,35	0	787
<i>N=20</i>						
Temel Durum	1,00	1823,13	316,68	2140,81	%12,8	21600
Esnek Zaman Penceresi	11,34	1644,68	289,81	1945,83	%17,55	21600
Sıkı Zaman Penceresi (SZP)	6,94	1919,89	360,68	2287,51	%7,36	21600
SZP, $f_c=11,6$	6,94	2704,74	360,68	3072,36	0	18540
SZP, $Q=2750$	25,07	2773,75	440,46	3239,28	%10,1	21600
<i>N=50</i>						
Temel Durum	6,42	3584,04	579,59	4170,04	%38,21	21600
Esnek Zaman Penceresi	14,08	3154,52	506,52	3675,12	%31,07	21600
Sıkı Zaman Penceresi (SZP)	103,23	3938,90	676,76	4718,31	%32,28	21600
SZP, $f_c=11,6$	197,12	5278,99	644,33	6120,44	%28,24	21600
SZP, $Q=2750$	128,82	5998,09	869,01	6995,92	%23,28	21600

Düğüm sayısı  $N=20$  iken en iyi sonuca yakınlık değerinin ortalama %8 olduğu,  $N=50$  olduğunda bu değer ortalama %33 olduğu görülmüştür. Temel durum modellerinde çok fazla zorlanmadan karşılanabilen gerçekçi zaman penceresi değerleri kullanılmıştır, fakat diğer satırlarda daha esnek ve daha sıkı zaman penceresi değerleri de analiz edilmiştir. Zaman penceresi değerleri daha sıkı olduğunda  $N=15$  iken model uygun çözümü daha çabuk bulur. Finansal maliyet ( $f_c$ ) arttıkça da benzer sonuçlar elde edilir ve böylece ekonomik kaygılar daha baskın hale gelir.

Ayrıca orta ve büyük boyutlu problemler için alt limit değerine yakınlığın artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada önerilen model literatüre yenilik getirirse ticari çözümlerle büyük boyutlu problemlerin en iyi değerini elde etmek uzun zaman gerektirmektedir. Bu nedenle bu örnekler için makul süreler içinde daha iyi çözümler elde etmek için sezgisel çözüm algoritmalarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışma belirtilen problemin çözümü için bir ilk adım oluşturmaktadır. Bu çalışmada problemin modellenmesine odaklanılmıştır ve amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşim, alternatif yol ve hız seçimleri ve yönetimsel görüşler analiz edilmiştir. Mevcut yazıda yer alan kısıtlamalar nedeniyle büyük örnekler için çözüm algoritmaları sunmayı gelecekteki çalışmalarımızda planlıyoruz.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında düğümler arasında alternatif bağlantılar içeren araç rotalama problemi sürdürülebilirliğin

üç ana konusu dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ürünleri müşterilere ulaştırarak şirket için dağıtım maliyetlerini, çevre için gaz salınımını ve sürücüler için çalışma koşullarındaki olumsuzlukları en aza indiren en uygun rotanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma bildiğimiz kadarıyla araç rotalama problemini finansal, çevresel ve sosyal amaçları aynı anda göz önünde bulundurarak analiz eden literatürdeki ilk çalışmadır. Bu çalışmada bu amaç fonksiyonlarını dikkate alan yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Ek olarak düğümler arası farklı zaman, uzunluk veya maliyet değerlerine sahip alternatif bağlantıları göz önünde bulundurarak literatüre katkı sağlanmıştır. Bu problem için çok amaçlı karma tamsayı matematiksel model geliştirilmiş ve çok amaçlı problemin çözümü için ağırlıklı toplam metoduyla melezlenmiş ölçeklendirme yöntemi önerilmiştir. Çoğunlukla gerçek hayat verileri ve farklı parametre değerleri kullanılarak finansal, çevresel ve sosyal amaçlar arasındaki ödünleşim analiz edilmiş ve sayısal sonuçlar sunulmuştur.

En uygun rotanın belirlenmesinde amaçlar arasındaki ödünleşimin önemli bir konu haline geldiği görülmüştür ve bu amaçlar eş zamanlı olarak ele alındığında daha dengeli rotalar elde edilmiştir. Ek olarak olası alternatifler arasındaki bağlantı ve hız seçimleri büyük ölçüde şirketin amacına ve problem kısıtlarına bağlıdır. Sosyal amaç daha önemli olduğunda daha hızlı rotalar seçilmeli veya ek araçlar kullanılmalıdır. Öte yandan çevresel amaç daha önemli hale geldiğinde daha uzun seyahat süreleri ortaya çıksa da daha düşük salınımı sağlayan rotalar oluşturulur. Ayrıca rota sürelerinin ülkenin belirlediği normal çalışma süresi

sınırlarından daha uzun olduğu durumlarda fazla mesai maliyetleri ortaya çıkar ve sosyal olarak daha dengeli rotalar oluşturmak oldukça önemli hale gelir. Sayısal analizlere bakıldığında problem için en uygun kararların problemin özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür.

Küçük boyutlu problemler için makul sürede en iyi çözüm elde edilse de problem boyutu büyüdüğünde kabul edilebilir sürelerde en iyi çözüme ulaşamamıştır. Bu nedenle bu problemin daha büyük boyutlu örneklerinin çözümü için yaklaşım algoritmaları geliştirmeyi planlıyoruz. Bu çalışmamızda problemin modellenmesine odaklandığımız için ve makalede yer alan kısıtlamalar nedeniyle bu tür algoritmaların geliştirilmesini ve analizini gelecekteki çalışmalarımıza bırakıyoruz. Ayrıca zamana bağlı hız seçimleri ve süreleri; sürelerin veya hızların bilinmeyen trafik koşulları nedeniyle rassal olduğu bu problemin versiyonları da gelecekte analiz edilebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eguia, I., Racero, J., Molina, J.C., Guerrero, F., 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, 2013.
2. Kopfer, H., W., Schönberger, J., Kopfer H., Reducing Greenhouse Gas Emissions of a Heterogeneous Vehicle Fleet. Springer Science+Business Media, 26, 221-248, 2013
3. Kok, A., L., Meyer, C., M., Kopfer, H., Schutten, J.M.J., A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and European Community Social Legislation. Transportation Science, 44 (4), 442-454, 2010.
4. Gagnon, E., P., Desaulniers, G., Drexler, M., Rousseau L-M., European Driver Rules in Vehicle Routing with Time Windows. Transportation Science, 44 (4), 455-473, 2010.
5. Tükenmez, İ., Üçlü sorumluluk yaklaşımıyla alternatif bağlantıları içeren araç rotalama modelleri ve çözüm yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2017.
6. Toth, P., Vigo, D., The vehicle routing problem. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
7. Garaix, T., Artigues, C., Feillet, D., Josselin, D., Vehicle Routing problem with alternative paths: An application to on-demand transportation, European Journal of Operational Research, 204, 62-75, 2010.
8. Kim, G., Ong, Y.S., Heng, C.K., Tan, P.S., Zhang, N.A., City Vehicle Routing Problem. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16, 1654-66, 2015.
9. Cheng, C., Qi, M., Wang, X., Zhang, Y., Multi-Period Inventory Routing Problem Under Carbon Emission Regulations. International Journal of Production Economics, 182, 263-275, 2016.
10. Toro, E. M., Franco, J. F., Echeverri, M. G., Guimaraes, F. G., A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. Computers & Industrial Engineering, 110, 114-125, 2017.
11. Xiao, Y., Konak, A., A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem. Journal of Cleaner Production, 167, 1450-1463, 2017.
12. Xiao, Y., Zuo, X., Huang, J., Konak, A., Xu, Y., The continuous pollution routing problem, Applied Mathematics and Computation, 387, 125072, 2020.
13. Giallanza, A., Puma, G., L., Fuzzy green vehicle routing problem for designing a three echelons supply chain, Journal of Cleaner Production 259, 120774, 2020
14. Ren, X., Huang, H., Feng, S., Liang, G., An improved variable neighborhood search for bi-objective mixed-energy fleet vehicle routing problem, Journal of Cleaner Production 275, 124155, 2020.
15. Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., Laporte, G., The fleet size and mix pollution-routing problem, Transportation Research Part B, 70, 239-254, 2014.
16. Yang, B., Hu, Z-H., Wei, C., Li, S-Q., Zhao, L., Jia, S., Routing with time-windows for multiple environmental vehicle types. Computers & Industrial Engineering, 89, 150-161, 2016.
17. Maden, W., Eglase, R., Black D., Vehicle Routing and Scheduling With Time-Varying Data: A Case Study. Journal of the Operational Research Society, 61, 515-522, 2010.
18. Franceschetti, A., Honhon, D., Woensel, T., V., Bektaş, T., Laporte G., The Time Dependent Pollution-Routing Problem. Transportation Research Part B, 56, 265-293, 2013.
19. Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., Xiao, J., Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. Journal of Cleaner Production, 171, 962-971, 2018.
20. Barth, M., Younglove, T., Scora, G., Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), California, USA, Technical report, <http://escholarship.org/uc/item/67f0v3zf>, 2005.
21. Nosrati, M., Khamseh, A., A., Distance discount in the green vehicle routing problem offered by external carriers, SN Applied Sciences 2, 1443, 2020
22. Suzuki, Y., A New Truck-Routing Approach for Reducing Fuel Consumption and Pollutants Emission. Transportation Research Part D, 16, 73-77, 2010.
23. Lai, M-Y., Liu, C-S., Tong, X-J, A two-stage hybrid meta-heuristic for pickup and delivery vehicle routing problem with time Windows, Journal of Industrial& Management Optimization, 6 (2), 435-451, 2010.
24. Demir, E., Bektaş, T., Laporte G., An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pollution-Routing Problem. European Journal of Operational Research, 223, 346-359, 2012.
25. Demir, E., Bektaş, T., Laporte G., The Bi-Objective Pollution Routing Problem. European Journal of Operational Research, 232, 464-478, 2014.

26. Kumar, R.S., Kondapaneni, K., Dixt, V., Goswami, A., Thakur, L.S., Tiwari, M.K., 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, 2016.
27. Li, J-Y., Hu, X., Wan, Z., An integrated bi-objective optimization model and improved genetic algorithm for vehicle routing problems with temporal and spatial constraints, *Journal of Industrial&Management Optimization*, doi:10.3934/jimo.2018200, 2018.
28. Küçükaydın H., Column generation based matheuristic for a vehicle routing problem with time windows and variable start time, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2061-2078, 2019.
29. Uçar U.U., İşleyen S.K., Gökçen H., Experimental analysis of Meta-Heuristic algorithms for moving customer vehicle routing problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 459-475, 2021.
30. Anvari, S., Turkay, M., The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability. *International Journal of Production Research*, 55 (21), 6266-6287, 2017.
31. Yousefikhoshbakht, M., Didehvar, F., Rahmati, F., An Effective Rank Based Ant System Algorithm for Solving the Balanced Vehicle Routing Problem. *International Journal of Industrial Engineering*, 23 (1), 2016.
32. Halvorsen-Weare, E.E., Savelsbergh, M. W. P., The bi-objective mixed capacitated general routing problem with different route balance criteria, *European Journal of Operational Research*, 251 (2), 451-465, 2016.
33. Turkensteen, M., The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing, *European Journal of Operational Research*, 262 (2), 647-659, 2017.

