



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Heterojen filolu ve kapasite kısıtlı yeşil araç rotalama problemi için matematiksel bir model ve endüstriyel bir uygulama

A mathematical model and an industrial application for green vehicle routing problem with the heterogeneous fleet and capacity

Yazar(lar) (Author(s)): Ali Emre AKCAKOCA¹, Salih HİMMETOĞLU², Yılmaz DELİCE³, Emel KIZILKAYA AYDOĞAN⁴

ORCID¹: [0000-0002-8192-4787](https://orcid.org/0000-0002-8192-4787)

ORCID²: [0000-0001-6081-3650](https://orcid.org/0000-0001-6081-3650)

ORCID³: [0000-0002-4654-0526](https://orcid.org/0000-0002-4654-0526)

ORCID⁴: [0000-0003-0927-6698](https://orcid.org/0000-0003-0927-6698)

To cite to this article: Akcakoca A. E., Himmetoğlu S., Delice Y. ve Aydoğan E.K., “A mathematical model and an industrial application for green vehicle routing problem with the heterogeneous fleet and capacity”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1345-1352, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Akcakoca A. E., Himmetoğlu S., Delice Y. ve Aydoğan E.K., “Heterojen filolu ve kapasite kısıtlı yeşil araç rotalama problemi için matematiksel bir model ve endüstriyel bir uygulama”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1345-1352, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1200084

Heterojen Filolu ve Kapasite Kısıtlı Yeşil Araç Rotalama Problemi için Matematiksel Bir Model ve Endüstriyel Bir Uygulama

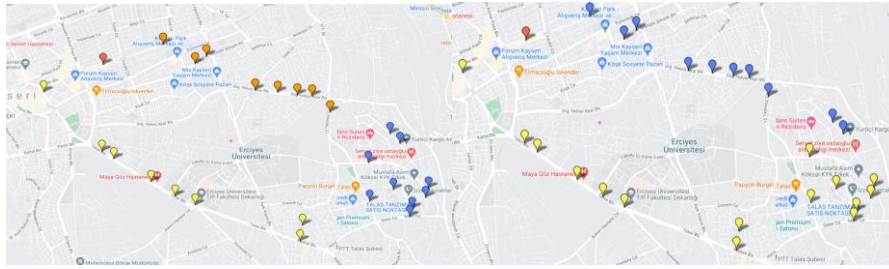
A Mathematical Model and an Industrial Application for Green Vehicle Routing Problem with the Heterogeneous Fleet and Capacity Constraints

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kapasite Kısıtlı Yeşil Araç Rotalama Problemi (YKARP) için heterojen filo kavramı dikkate alınmaktadır./Heterogeneous fleet concept is taken into account for the Green Vehicle Routing Problem with Capacity Constraint (GCVRP).
- ❖ Matematiksel bir model sunularak gerçek bir hayat problemi çözülmüştür./ A real-life problem is solved by presenting a mathematical model.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma yakıt tüketimini ve karbon salınımını dikkate alarak heterojen filolu YKARP için matematiksel model sunmaktadır. /This paper presents a mathematical model for the GCVRP with heterogenous fleet considering fuel consumption and carbon emission.



Şekil. Mevcut (a) ve önerilen (b) rotaları / **Figure.** Current (a) and proposed (b) routes

Amaç (Aim)

Amaç farklı özelliklere sahip araçlar ele alınarak YKARP'yi çözmektir. / The aim is to solve the GCVRP by considering the vehicle with different features.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Araç yakıt tüketimi ve karbon emisyonu hesaplama yöntemleri dikkate alınarak matematiksel bir model önerilmiştir. / A mathematical model is proposed considering the vehicle fuel consumption and carbon emission calculation methods.

Özgünlük (Originality)

Araç Rotalama Problemi için çevresel ve sürdürülebilir kavramlar dikkate alınmaktadır. / Environmental factors and sustainability concepts are considered for the Vehicle Routing Problem.

Bulgular (Findings)

Mevcut uygulanan rotanın maliyeti 418.35 ve önerilen rotanın maliyeti 228.28'dir. / The cost of the current route is 418.35 and the cost of the proposed route is 228.28.

Sonuç (Conclusion)

Önerilen matematiksel model gerçek hayat uygulaması için önemli tasarruf sağlamıştır. / The proposed mathematical model has provided significant savings for real-life application.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Heterojen Filolu ve Kapasite Kısıtlı Yeşil Araç Rotalama Problemi için Bir Matematiksel Model ve Endüstriyel Bir Uygulama

Araştırma Makalesi / Research Article

Ali Emre AKCAKOCA¹, Salih HİMMETOĞLU^{2*}, Yılmaz DELİCE³, Emel KIZILKAYA AYDOĞAN¹

¹Mühendislik Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye

²Develi Hüseyin Şahin Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve ORhanizasyon Bölümü, Kayseri Üniversitesi, Türkiye

³Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Kayseri Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 06.11.2022 ; Kabul/Accepted : 04.06.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 17.07.2023)

ÖZ

Günümüzde Araç Rotalama Problemlerinde (ARP) operasyonel kriterlerle birlikte çevresel faktörler ve sürdürülebilirlik kavramları da dikkate alınmaktadır. Çevresel faktörleri ele alarak oluşturulan ARP, Yeşil ARP (YARP) olarak adlandırılmaktadır. Küresel ısınmayı sebep olan en önemli faktörlerden biri karbon salınımidir. YARP'de karbon salınımı operasyonel maliyetler içerisinde dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada Yeşil Kapasiteli ARP (YKARP) için bir matematiksel model önerilmektedir. Farklı özelliklere sahip araçlar ele alınarak YKARP'nin çözülmesi amaçlanmaktadır. Önerilen model bir mobilya firmasındaki personel servis araçlarının rotalarını belirlemede uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen matematiksel modelin YKARP'ler için başarılı sonuçlar verebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: YKARP, matematiksel modelleme, sürdürülebilirlik, yeşil araç rotalama.

A Mathematical Model and An Industrial Application for Green Vehicle Routing Problem with the Heterogeneous Fleet and Capacity Constraints

ABSTRACT

Today, environmental factors and sustainability concepts are taken into account along with operational criteria in Vehicle Routing Problems (VRP). The VRP that addresses environmental factors is called Green VRP (GVRP). One of the most critical factors causing global warming is carbon emissions. In GVRP, carbon emissions should be taken into account with operational costs. This study proposes a mathematical model for Green Capacity VRP (GCVRP). It is aimed to solve GCVRP by considering vehicles with different characteristics. The proposed model has been applied to determine the routes of personnel service vehicles in a furniture company. The obtained results show that the proposed mathematical model can give successful results for GCVRPs.

Keywords: GCVRP, mathematical modeling, sustainability, green vehicle routing.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Lojistik faaliyetlerinin en temel maliyet kalemlerinden biri taşıma/ulaşım faaliyetleridir. Araç sayısı, araçların kapasitesi ve araçların güzergâhı gibi temel karar verme süreçleri, ulaştırma faaliyetlerinin maliyetlerini etkileyen en önemli kriterlerdir. İlk olarak 1959 yılında Dantzing ve Ramser [1] tarafından homojen filodan oluşan araçların ulaştırma maliyetlerini minimize etmek için araç sayısı ve rotasını dikkate alan Kamyon Sevkiyat Problemi sunulmuştur. Daha sonra, Clarke ve Wright [2] bu bakış açısını genelleştirerek doğrusal optimizasyon problemine dönüştürmüşlerdir. Buna göre bu yeni problemde depodan çıkan araçların birçok teslim noktasına en kısa rota ile gidilmesini amaçlamışlardır. Geçmişten günümüze Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak adlandırılmış bu problem, Yöneylem Araştırmaları alanında teorik ve pratik anlamda yaygın

olarak ele alınan bir araştırma konusu olmuştur. ARP, bir veya birden fazla depodan çıkan araçların en uygun rota oluşturularak müşterilere veya hizmet götürülecek kişilere ulaştırılmasını amaçlayan eniyileme problemi olarak tanımlanabilir [3].

Gün geçtikçe ARP kullanım amaçlarına göre birçok varyasyonda karşımıza çıkmaya başlamıştır. Temel olarak araçlar tarafından alınan mesafe ve/veya süreyi dikkate alan ARP'ye kapasite kısıtı eklenirse Kapasiteli ARP (KARP) [4], kapasite kısıtının üstüne mesafe kısıtı eklenirse Mesafe ve Kapasite Kısıtlı ARP (MKARP) [5], talebi sadece belirli zamanlarda karşılanıyorsa Zaman Pencereci ARP (ZPARP) [6] olarak ele alınmaktadır. Geçmişten günümüze kadar ARP üzerine birçok çalışma yapılmıştır [7], [8], [9], [30], [31]. Son zamanlarda ise ARP, zamanın gerektirdiği yeni problemleri de yansıtabilmek adına yeni bakış açıları sunarak güncel

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : salihhimmetoglu@kayseri.edu.tr

amaçlara hizmet etmesi sağlanmaktadır [10]. Bu doğrultuda ‘çevresel faktörler’ ve ‘sürdürülebilirlik’ kavramları en çok öne çıkan bakış açıları olarak dikkat çekmektedir.

Günümüzde geleneksel enerji kaynakları olarak bilinen karbon bazlı fosil yakıtların kullanımı, sera gazlarının artmasına ve küresel ısınmaya neden olduğu bilinmektedir. Bu durumda devletler, çevre ve insan yaşamı konusunda daha hassas hale gelerek KYOTO protokolü ve Paris Sözleşmesi gibi küresel antlaşmaları uygulamaya geçirmişlerdir. Bununla birlikte toplum bilincinin de artması, işletmelerin rekabetçi ortamda ayakta kalabilmesi için daha çevreci ve sürdürülebilir stratejiler geliştirmesine mecbur bırakmıştır. Bu nedenle, şirket ve işletmelerin mal ve hizmet üretiminde çevreci yaklaşımlar ile ekonomik faaliyetleri yürütmek temeline dayanan sürdürülebilir lojistik kavramı büyük önem kazanmıştır. Tüketilen fosil yakıtlar ve ortaya çıkan sera gazlarını en küçükleme sürdürülebilir lojistik stratejisinin en önemli hedeflerinden biri haline gelmiştir. Avrupa Çevre Ajansı (The European Environment Agency-EEA) tarafından yayınlanan ‘Avrupa’da Karayolu Taşımacılığı için Yakıtların ve Biyoyakıtların Sera Gazı Salınım Yoğunluğu’ rapora göre [11], Avrupa’daki toplam sera gazı salınımlarının yaklaşık %25’inin ulaşım sektöründen kaynaklanması, sürdürülebilir lojistik kavramının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda sürdürülebilir taşıma ve ulaşım faaliyetlerini gerçekleştirmek için yeşil araç rotalama operasyonları son zamanlarda ele alınan en popüler lojistik karar verme süreçlerinden biri haline gelmiştir.

Literatürde çevresel faktörleri dikkate alarak Yeşil ARP’nin (YARP) konseptini tanımlayan ilk çalışma Erdoğan ve Miller-Hooks [12] tarafından sunulmuştur. Klasik ARP’de çevresel ve ekonomik parametrelerin de birlikte ele alınması gerektiğini ileri sürerek ilgili problemin çözümü için bir Karma-Tam Sayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli önermişlerdir. Ortaya koydukları bu bakış açısı ile birlikte YARP, literatürde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Poonthalir ve Nadarajan [13] YARP’lerinde yakıt maliyetini ve rota maliyetini en küçükleme için değişen hız kısıtlı iki amaçlı bir problemi ele almışlardır. Hedef programlama kullanarak problem için matematiksel model oluşturmuşlardır. Ayrıca parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasını kullanarak problemi çözmeyi amaçlamışlardır. Sawik vd. [14] YARP’de araçları çizelemek için toplam alınan mesafeler, yakıt tüketimi ve toplam yakıt maliyetlerinin yanı sıra çevresel maliyetleri, gürültü ve sera gazı salınımını da ele alan çok faktörlü bir çalışma sunmuşlardır. Sürüş mesafe ve sürelerinin çevresel amaçlarla ilişkili olduğunu analiz etmişlerdir. Wang vd. [15] kapasite kısıtlı YARP’yi (KYARP) çözmek için yarışmacı memetik algoritmayı kullanmışlardır. Mehlatat vd. [16] YARP’yi çözmek için hibrit bir genetik algoritma önermişlerdir. İlgili problem için heterojen araç filosu ve bulanık seyahat zamanını dikkate almışlardır. Yu vd. [17] heterojen araç

filosunu dikkate alarak Zaman Pencereli YARP’yi (ZPYARP) çözmek için geliştirilmiş dal-fiyat algoritmasını önermişlerdir. Ren vd. [18] benzin, dizel ve elektrikli yakıt alternatiflerinden oluşan hibrit enerji araçlarını dikkate alarak YARP’yi çözmek için değişken komşuluk arama algoritmasını kullanmışlardır. Li vd. [19] çok depolu YARP için seyahat süreleri ve toplam kar ile birlikte karbon salınımlarını ele alarak geliştirilmiş karınca koloni optimizasyonu algoritması önermişlerdir. Afshar-Bakeshloo vd. [20] heterojen araç filolu ZPYARP için çevresel maliyet, toplam maliyet ve müşteri memnuniyetini dikkate alarak çok amaçlı bir KTDP modeli önermişlerdir. Abdullahi vd. [21] ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik kavramlarını dikkate alarak YARP’ni çözmek için iteratif açgözlü yerel arama metodu önermişlerdir. Nyako vd. [22] ZPYARP’de uzaklık, taşıma süresi ve yakıt tüketimini minimize etmek için matematiksel model önermişlerdir. Sun vd. [23] YARP’de yakıt tüketim problemini dikkate alarak enerji tasarrufu ve karbon salınımını azaltmak için bir matematiksel model sunmuşlardır. Ayrıca büyük boyutlu problemler için kesikli öğretim ve öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmasını önermişler ve önerilen algoritmanın performansını değerlendirmek için 32 farklı problemde test edilmiştir. Bruglieri vd. [24] alternatif enerji kaynakları ile çalışan araçlar için toplam seyahat mesafelerini ele alarak KTDP modeli ve yol bazlı sezgisel bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Matos vd. [25] YARP için karbon salınımını minimize ederek araç filolarının çizelgelenmesinde tekrarlı yerel arama ve rastgele değişken komşuluk prosedürünü birleştiren hibrit bir algoritma önermişlerdir. Paulo vd. [26] YARP’lerinde karbon salınımını minimize etmek için yerel ve popülasyon arama tabanlı genetik algoritma kullanmışlardır. Jabir vd. [27] çok depolu YKARP için ekonomik maliyeti ve karbon salınım maliyetini birlikte ele almışlardır. Küçük boyutlu problemler için tam sayılı doğrusal programlama (TDP) modeli geliştirmiş ve büyük boyut problemler için karınca kolonisi optimizasyonu ve değişken komşuluk arama algoritmalarını entegre etmişlerdir. Ferreira vd [28] iki boyutlu yükleme kısıtlı ve ayrık teslimatlı YARP için kısıt programlama modeli geliştirmişlerdir. Son yıllarda yapılan yayınların artması nedeniyle YARP literatürü için ayrıntılı bazı literatür çalışmaları da mevcuttur. Asghari vd. [29] 2000 ve 2020 yılları arasında YARP ile ilgili yayınlanmış 313 çalışmayı içeren ayrıntılı bir literatür çalışması hazırlamışlardır. Moghdani vd. [30] ise YARP literatürünü sekiz alt başlıkta kategorize ederek YARP’nin farklı yönlerini geniş bir ölçekte analiz etmişlerdir.

YARP ile dağıtım ağlarını ve kat edilen mesafeleri optimize ederek tüketilecek yakıtı en küçükleme, kısıt olan doğal enerji kaynaklarının daha az tüketilmesi ve küresel ısınma sorununun temel sebebi olan karbon salınımı ve karbon ayak izi miktarının düşürülmesini amaçlanmaktadır. Bu durum, dağıtım ağının optimize edilmesi, araç rotalarının ve filolarının en iyi şekilde

organize edilmesi ile mümkün olacaktır [3]. Bu doğrultuda ekonomik, çevresel ve sosyal fayda gibi birbiriyle çatışan amaçlar eş zamanlı olarak dikkate alınması gerekmektedir [31]. Bu çalışmada çevresel sürdürülebilirlik (karbon salınımı), ekonomik sürdürülebilirlik (minimum yakıt tüketim maliyeti) ve sosyal sürdürülebilirlik (daha kolay ve daha verimli ulaşım) kavramlarını ele alan GKARP bir matematiksel model önerilmektedir. Filodaki araçların özelliklerini ve farklılıklarını yansıtan araç motor hacmi, motor sürtünme faktörleri, araç ve yük ağırlıkları, yakıt tüketimlerini etkileyen faktörler olarak ele alınmıştır. Her aracın atandığı rotaya göre karbon salınımını hesaplamak için Tier-1 yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca filodaki aracın kullanım durumuna göre ortaya çıkan operasyon hazırlık maliyetleri (araç eskime payı, şoför birim ücreti, araç tamir-bakım ve malzeme giderleri vb.) Çalışmanın giriş bölümünde problemin genel çerçevesi ve literatür taraması sunulduktan sonra ikinci bölümünde problem tanımı, yakıt tüketim hesabı, karbon salınım hesabı için kullanılan Tier-1 yöntemi ve önerilen matematiksel model anlatılmıştır. Üçüncü bölümde bir gerçek hayat problemi önerilen matematiksel model ile çözülmüş ve bulgular değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

2. PROBLEMİN TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Bu çalışmada farklı araçlardan kaynaklanan yakıt tüketimi, karbon salınım ve operasyon hazırlık maliyetleri dikkate alınarak YKARP için matematiksel model sunulmaktadır. Gerçek hayattaki araç rotalama süreçlerinde birden fazla araç tipi bulunabilmektedir. Her araç tipi k ile ($k = 1, \dots, K$) herhangi bir i durağından j durağına ($i, j = 1, \dots, N$) gidişte tüketilecek yakıt ve egzoz karbon salınımı bir olmayacaktır. Bununla birlikte ilk durak ve son durak aynıdır. Yani her k aracı ana duraktan çıkarak kendi rotasına atanan duraklara sırasıyla uğrayarak geri ana durağa döner. Her aracın motor hacmi, ağırlığı ve fiziksel özelliklerine göre kendine ait bir insan taşıma kapasitesi (Q_k) vardır. Hiçbir araç bu taşıma kapasitesini aşamaz. Şehir içi yolcu taşımacılığı hizmeti veren minibüs ve otobüs gibi araçlar uğradıkları her i durağından müşteri aldıkları gibi bazı duraklarda da müşteri indirebilirler. Bu nedenle duraklarda inen ve binen müşteri sayısını önceden bilmek veya tahmin etmek ayrı bir çalışma gerektirmektedir. Bu çalışmada ana duraktan çıkan araçlar kendi rotalarındaki her duraktan sadece müşteri alarak, yani herhangi bir indirme olmadan, ana durağa geri dönmektedirler. Her aracın sahip olduğu özelliklere göre birim yakıt tüketimi ve karbon salınımları değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle rotalara atanan araçlar için araç yakıt tüketim hesabı ve karbon salınımı hesabı için kullanılan Tier-1 yöntemi ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde anlatılmaktadır.

2.1. Araç Yakıt Tüketimi (The Vehicle Fuel Consumption)

Bu çalışmada her araç için yakıt tüketimini hesaplarken Barth vd. [32] tarafından geliştirilen model uygulanmaktadır. Barth vd. [32] önerilen bu yakıt tüketim modeli (YTM), çeşitli ARP problemleri için literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [33], [34], [35], [36], [37]. Bu YTM'de yol eğiminden motor özelliklerine yakıt tüketimini etkileyen on altı farklı parametre kullanılmaktadır. YTM formülü denklem 1'de ve YTM'de kullanılan parametreler Çizelge 1'de sunulmaktadır. Denklem 1'de araç için birim yakıt tüketim değeri hesaplanır. Toplam rotadaki yakıt tüketimi (YT) için YTM değeri aracın duraklar arasında aldığı seyahat mesafesi (d) ile çarpılır ve aracın duraklar arasında almış olduğu sabit hıza (AH) bölünür (Denklem 2).

Çizelge 1. Yakıt tüketim modeli parametreleri ve değerleri (Parameters and values of the fuel consumption model)

Sembol	Açıklama	Birim
YH	Yakıt-hava kütle oranı	–
I	Yakıt ısıtma değeri	kJ/gr
DF	Dönüşüm faktörü	gr/lt
SF	Motor sürtünme faktörü	kJ/dev/lt
MH	Motor hızı	dev/sn
MV	Motor hacmi	lt
HY	Hava yoğunluğu	kg/m ³
YA	Araç ön yüzey alanı	m ²
BA	Araç boş ağırlığı	kg
α	Yol eğimi	°
SK	Aerodinamik sürtünme katsayısı	–
DK	Dönme direnci katsayısı	–
OV	Aktarma organı verimliliği	%
VP	Motor verim parametresi	%
AH	Ortalama araç hızı	m/sn
g	Yer çekimi ivmesi	m/sn ²

2.2. Araç Karbon Salınımı (The Vehicle Carbon Emission)

Bu çalışmada YKARP için karbon salınım miktarı hesaplanırken literatürde yaygın bir şekilde kullanılan Tier-1 yöntemi kullanılmıştır [38], [39]. Tier-1 yöntemi yakıt tüketimlerine göre bazı karbon salınım faktörlerini kullanarak uygulanan bir yöntemdir. Karbon salınımı karbon-di-oksit (CO₂) cinsinden hesaplanmaktadır. Bu yöntemde karbon salınımını hesaplayabilmek için yakıt tüketimine de ihtiyaç duyulmaktadır. Araç için kullanılan yakıt türü karbon salınımı için büyük önem arz etmektedir. Çünkü her yakıt türünün ortaya çıkardığı karbon salınım miktarı aynı olmayabilir. Bu nedenle yakıt türünden dolayı araçta kullanılan motor cinsi ve motor özellikleri yakıt tüketim miktarını değiştirdiği için karbon salınımı da değişmektedir. Çizelge 2'de Tier-1 yönetimden kullanılan parametreler ve denklem-3'te CO₂ salınım formülü sunulmaktadır. Denklem-2'de yakıt tüketimi ile dönüşüm faktörünün çarpımı enerji tüketim miktarını vermektedir. Tüketilen enerji ile karbon salınım faktörü çarpıldığında enerji kaynağı içerisindeki karbon miktarı hesaplanır.

$$YTM \left(\text{lt/s} \right) = \frac{YH}{1-DF} \cdot \left[SF \cdot MH \cdot MV + \frac{0.5 \cdot SK \cdot HY \cdot YA \cdot AH^3 + BA \cdot AH \cdot (g \cdot \sin \alpha + g \cdot DK \cdot \cos \alpha)}{1000 \cdot OV \cdot VP} \right] \quad (1)$$

Enerji açığa çıkması için motor içerisindeki yakıt yandığında yakıt içerisindeki karbon miktarı belli oranda oksitlenir. Oksitlenme sonucu CO gazı yayılır. Yayılan CO miktarını CO₂'ye dönüştürmek için mol oranı kullanılır.

$$YT(lt) = YTM \cdot \frac{d}{AH} \quad (2)$$

$$CO_2 \text{ salınımı} = YT \cdot D \cdot KF \cdot KO \cdot M \quad (3)$$

Çizelge 2. Tier-1 parametreleri (Tier-1 parameters)

Sembol	Açıklama	Birim
YT	Yakıt tüketimi	t
D	Dönüşüm faktörü	Tj/kt
KF	Karbon salınım faktörü	tC/Tj
KO	Karbon oksitlenme oranı	-
M	Mol oranı	-
CS	CO ₂ salınımı	ggCO

2.3. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu çalışmada YKARP için önerilen matematiksel model aşağıda verilmektedir. Modelde kullanılan notasyonlar Çizelge 3'te sunulmaktadır.

Çizelge 3. Matematiksel model notasyonlar (Mathematical model notations)

Sembol	Açıklama
<i>İndisler</i>	
i, j	Durak numarası ($i, j = 1, \dots, N$)
k	Araç numarası ($k = 1, \dots, K$)
<i>Parametreler</i>	
N	Durak sayısı
K	Araç sayısı
D_j	j durağından binen kişi sayısı
Q_k	k aracının kapasitesi (kişi)
$BYTM$	Birim yakıt tüketim maliyeti (pbr/lt)
$BSCM$	Birim karbon salınım maliyeti ($pbr/ggCO$)
AKM_k	k aracının kullanım maliyeti (pbr)
<i>Karar değişkenleri</i>	
X_{ijk}	i durağından j durağına k aracıyla gidilirse 1, diğer durumlarda 0
Y_k	k aracı herhangi bir durağa atanırsa 1, diğer durumlarda 0
U_i	i durağının kaçınıcı sırada ziyaret edileceğini karar veren değişken

Denklem-4 amaç fonksiyonu olarak yakıt tüketim maliyeti, CO₂ salınım maliyeti ve araç kullanım

Amaç fonksiyonu:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K BYTM \cdot YTM_{ijk} \cdot X_{ijk} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K BSCM \cdot CS_{ijk} \cdot X_{ijk} + \sum_{k=1}^K AKM_k \cdot Y_k \quad (4)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^N X_{ijk} = \sum_{i=1}^N X_{jik} \quad \forall j = 1, \dots, N \text{ ve } k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad \forall j = 2, \dots, N \text{ ve } i \neq j \quad (6)$$

maliyetinin toplamını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Burada YTM_{ijk} değerleri her bir durak ve araç için denklem-2 ile hesaplanmaktadır. Ayrıca CS_{ijk} değerleri de denklem-3 ile hesaplanmaktadır. Denklem-5 her durağa kaç araç girmişse o kadar aracın çıkmasını sağlamaktadır. Denklem-6 başlangıç durağı hariç her durağa bir araç girişinin olmasını sağlamaktadır. 7. ve 8. denklemler başlangıç durağından herhangi bir durağa sadece bir araçla gidilmesini ve ilgili araç kullanıldığında araç kullanım maliyetini amaç fonksiyonuna yansıtmak için Y_k karar değişkeninin 1 olmasını sağlamaktadır. Denklem-9 ise k aracına atanan duraklardaki kişi sayısının aracın kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Denklem-10 ise alt turların önüne geçilmesi için kullanılmaktadır. Denklem-11 ise karar değişkenlerini sınırlayan 0-1 tamsayı kısıttır.

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM İÇİN BİR UYGULAMA (AN APPLICATION FOR THE PROPOSED APPROACH)

Bu çalışmada YKARP için önerilen matematiksel model, Kayseri'deki önemli bir mobilya firmasının personel servis araçlarının rotalarını belirlemek için uygulanmıştır. İlgili mobilya firması, birçok ülkeye ihracat yapan dünya çapında önemli bir firmadır. Firma olarak operasyonel maliyetlerin yanı sıra küresel ısınma ve sürdürülebilirlik kavramlarını şirket politikalarına eklemiştir. Bu nedenle personel taşıma lojistik faaliyetlerinde sürdürülebilir bir uygulama kullanmak istemektedirler. İlgili firmanın Kayseri'nin çeşitli bölgelerinde yaşayan çok sayıda çalışanı bulunmaktadır. Bu çalışmada Kayseri'nin Talas ilçesinin en büyük üç mahallesinde yaşayan çalışanlar için YKARP dikkate alınmıştır. Çalışanların yaşadıkları bölgelere göre daha önceden belirlenmiş yirmi beş durak üzerinden rotalar belirlenmiş ve durak yeri seçimi ile alakalı herhangi bir süreç bu çalışma kapsamına dahil edilmemiştir. Firmanın araç filosundaki sayıya göre ilgili bölge için ayrılan araç sayısı en fazla üçtür. Yani ilgili bölgeler için en fazla üç rota söz konusudur. İhtiyaca göre araç sayısı daha da az olabilir. İlgili araçlar için yakıt tüketimini etkileyen genel parametreler Çizelge 4'te sunulmaktadır.

$$\sum_{j=1}^N X_{1jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$\sum_{j=2}^N X_{1jk} \leq Y_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N D_j \cdot X_{ijk} \leq Q_k \quad (9)$$

$$U_i - U_j + N \cdot X_{ijk} \leq N - 1 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \text{ ve } i \neq j \quad (10)$$

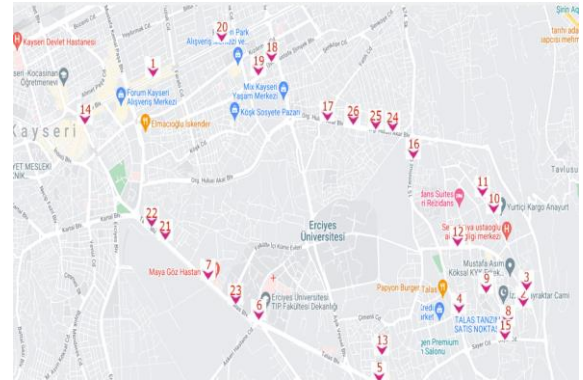
$$X_{ijk}, Y_k \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (11)$$

Çizelge 4. Uygulama için genel yakıt tüketim parametreleri

Sembol	<i>YH</i>	<i>I</i>	<i>DF</i>	<i>SF</i>	<i>MH</i>	<i>MV</i>	<i>HY</i>	<i>YA</i>
Birim	–	kJ/gr	gr/lt	kJ/dev/lt	dev/sn	l	kg/m ²	m ²
Değer	1	44	737	0.2	33	Değişken	1.2041	3.912
Sembol	<i>BA</i>	α	<i>SK</i>	<i>DK</i>	<i>OV</i>	<i>VP</i>	<i>AH</i>	<i>g</i>
Birim	kg	°	–	–	%	%	m/sn	m/sn ²
Değer	Değişken	0	Değişken	0.01	0.4	0.9	60	9.81

Üç aracın da motor yakıt türü motorin diğer adıyla dizeldir. Üç aracın yakıt tüketim parametreleri benzerlik taşımalarına rağmen motor hacmi, araç boş ağırlığı ve aerodinamik sürtünme katsayıları farklılık göstermektedir. Yakıt tüketimindeki değişken parametrelerin değerleri Çizelge 5'te sunulmaktadır. Bununla birlikte her araç için karbon salınımını hesaplamada Tier-1 yönteminde kullanılan parametreler Çizelge 6'da sunulmaktadır. Tier-1 yöntemi için gerekli olan *YT* değeri *YTM* ile hesaplanmaktadır. Denklem-4'teki amaç fonksiyonunda yer alan *BYTM* ve *BCSM* değerleri 1 para birimi (pbr) olarak kabul edilmiştir. Yirmi beş durağın navigasyon konumları 'Google Haritalar' uygulaması kullanılarak belirlenmiştir. Durakların konumları Şekil 1'de sunulmaktadır. Her durağın enlem ve boylam bilgileri belirlendikten sonra

duraklar arası mesafeler hesaplanmıştır. Her aracın kapasitesi ve birim operasyonel maliyeti Çizelge 7'de sunulmaktadır.


Şekil 1. Durakların Google Haritalar üzerindeki konumları (Locations of the bus stations on Google Maps)

Çizelge 5. Araçlar için yakıt tüketim değişkenleri (Fuel consumption variables for the vehicles)

	<i>MV</i> (lt)	<i>BA</i> (kg)	<i>SK</i>
Araç-1	6	9000	0.8
Araç-2	4	6000	0.7
Araç-3	2	3500	0.6

Çizelge 6. Araçlar için karbon salınım parametreleri (Carbon emission parameters for the vehicles)

Sembol	<i>YT</i>	<i>D</i>	<i>KF</i>	<i>KO</i>	<i>M</i>
Birim	<i>t</i>	<i>Tj/kt</i>	<i>tC/Tj</i>	–	–
Değer	Değişken	44.3	20.2	0.99	44/12

Çizelge 7. Araç kapasiteleri ve birim hazırlık maliyetleri (Vehicle capacities and unit setup costs)

	<i>Q_k</i> (kişi)	<i>AKM</i> (pbr)
Araç-1	60	10
Araç-2	40	9
Araç-3	30	8

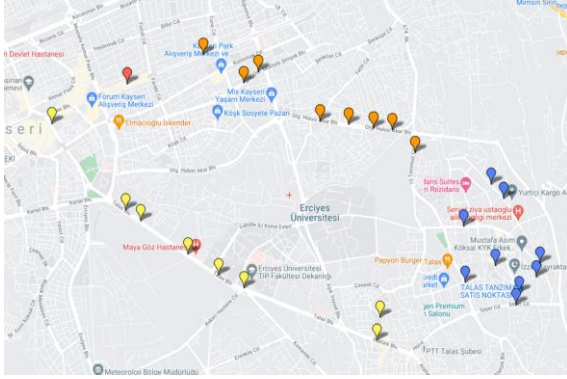
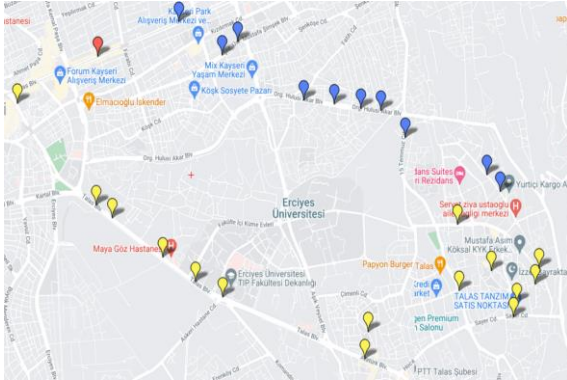
Mevcut rotalar ve maliyetler Çizelge 8'de verilmiş, mevcut rota Şekil 2'de görselleştirilmiştir. Önerilen matematiksel model belirtilen problem için uygulandığında belirlenen araçlardan ikisinin yeterli olduğu ve dolayısıyla iki rotanın belirlendiği görülmektedir. Matematiksel model ile elde edilen rotalar ve maliyetleri Çizelge 9'da ve elde edilen çözümün görseli Şekil 3'te sunulmaktadır. Mevcut uygulanan rotalar elde edilen maliyet yaklaşık 418.35 pbr'dir. İlgili uygulama önerilen matematiksel model dikkate alınarak IBM ILOG CPLEX 12.8'de çözülmüş ve yaklaşık olarak 228.28 pbr'lik bir maliyet elde edilmiştir. Elde edilen sonuç optimaldir ve iki saatten daha az bir sürede sonuç elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 190.07 pbr'lik bir tasarruf sağlanmış, ayrıca üçüncü aracın da kullanılmasına gerek kalmamıştır.

Çizelge 8. Mevcut rota ve maliyetleri (Available routes and costs)

	Renk	YT (pbr)	CS (pbr)	AKM (pbr)	Rota
Araç-1	Sarı	2.3582	76.6555	10	1-14-5-13-21-22-23-24-25-1
Araç-2	Mavi	5.4475	177.0733	9	1-15-8-4-8-2-3-12-10-11-1
Araç-3	Turuncu	3.8747	125.9503	8	1-20-18-19-16-24-25-26-17-1

Çizelge 9. Matematiksel model ile elde edilen sonuçlar (Results obtained with mathematical model)

	Renk	YT (pbr)	CS (pbr)	AKM (pbr)	Rota
Araç-1	Sarı	3.5414	108.1180	10	1-12-15-9-2-3-8-4-13-5-6-7-14-1
Araç-2	Mavi	3.6000	94.0224	9	1-18-10-11-16-17-19-20-1
Araç-3	Turuncu	-	-	-	-

**Şekil 2.** Mevcut uygulamada araçların rotaları (Routes of the vehicles on available application)**Şekil 3.** Matematiksel model ile araçların rotaları (Routes of the vehicles with mathematical model)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Günümüzde küresel ısınmaya ve sera gazı etkisine neden olan en büyük faktör karbon salınımlarıdır. Dünyada en çok karbon salınımı yapan sektörlerden biri de ulaşım sektörüdür. Bu doğrultuda ulaşımdan kaynaklı karbon salınımlarını azaltabilmek için devletler ve şirketler sürdürülebilirlik kavramını benimsemişlerdir. Bu çalışmada ARP'de yakıt tüketim maliyeti ve araç kullanım maliyetlerinin yanı sıra yakıt tüketiminden kaynaklı karbon salınımları da dikkate alınarak YKARP için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen matematiksel modelde araç yakıt tüketimi hesabı için YTM ve karbon salınımı hesabı için Tier-1 yöntemi kullanılmıştır. Önerilen matematiksel model Kayseri'deki bir mobilya firmasının personel servis araçları için uygulanmıştır. İki farklı rota oluşturularak

üç alternatif araç arasından birinci ve ikinci araç tercih edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda ARP için sürdürülebilirlik çerçevesinde alternatif enerji kaynaklı araçlar, zaman pencereli rotalama süreçleri ve heterojen filolar dikkate alınarak gerçek hayat problemleri için daha farklı kısıtlar ele alınabilir. Böylece daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca ARP'ler NP-zor sınıfında yer alan problemlerden olduğu için bu tip problemlerde kesin çözümü bulmak çok zordur. Problemden değişkenler, kısıtlar arttıkça problemin çözüm süresi üstel olarak artmakta ve çözümü bulmak daha da zorlaşmaktadır [40]. Bu sebeple kabul edilebilir sürede kabul edilebilir sonuçlar veren probleme özgü sezgisel veya meta sezgisel yöntemler gelecek çalışmalarda geliştirilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ali Emre AKCAKOCA: Matematiksel model / Mathematical model.

Salih HİMMETOĞLU: Matematiksel model / Mathematical model.

Yılmaz DELİCE: Makalenin yazımı ve düzenlemesi / Writing and editing manuscript

Emel KIZILKAYA AYDOĞAN: Makalenin yazımı ve düzenlemesi / Writing and editing manuscript

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dantzig G. B. and Ramser J. H., "The truck dispatching problem", *Management Science*, 6(1), 80-91, (1959).
- [2] Clarke G. and Wright, J. W. "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, 12(4), 568-581, (1964).

- [3] Bruglieri M., Ferone D., Festa P. and Pisacane O., "A grasp with penalty objective function for the green vehicle routing problem with private capacitated stations", *Computers and Operations Research*, 143, 105770, (2022).
- [4] Bozyer Z., Alkan A. ve Fıçlalı A., "Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin çözümü için önce grupla sonra rotala merkezli sezgisel algoritma önerisi", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 7(2), 29-37, (2014).
- [5] Kara I. and Derya T., "Polynomial size formulations for the distance and capacity constrained vehicle routing problem", *In AIP Conference Proceedings*, September, American Institute of Physics, 1389(1), 1713-1718, (2011).
- [6] Göçken T., Yaktubay M. and Kilic F., "Zaman pencereli araç rotalama problemi çözümü için çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımı", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6(4), 774-786, (2018).
- [7] Koç Ç. and Karaoğlan İ., "Zaman bağımlı araç rotalama problemi için bir matematiksel model", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), (2014).
- [8] Keskintürk T., Topuk N. ve Özyeşil O., "Araç rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri", *İşletme Bilimi Dergisi*, 3(2), 77-107, (2015).
- [9] Ramachandran Pillai R. and Arock M., "Spiking neural firefly optimization scheme for the capacitated dynamic vehicle routing problem with time windows", *Neural Computing and Applications*, 33(1), 409-432, (2021).
- [10] Daneshzand F., "The vehicle-routing problem", *Logistics Operations and Management*, 8, 127-153, (2011).
- [11] Agency E. E., "Greenhouse gas emission intensity of fuels and biofuels for road transport in Europe", *European Environment Agency*, 2020.
- [12] Erdoğan S. and Miller-Hooks E., "A green vehicle routing problem", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114, (2012).
- [13] Poonthalir G. and Nadarajan R., "A fuel-efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP)", *Expert Systems with Applications*, 100, 131-144, (2018).
- [14] Sawik B., Faulin J. and Pérez-Bernabeu E., "A multicriteria analysis for the green VRP: A case discussion for the distribution problem of a Spanish retailer", *Transportation Research Procedia*, 22, 305-313, (2017).
- [15] Wang L. and Lu J., "A memetic algorithm with competition for the capacitated green vehicle routing problem", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(2), 516-526, (2019).
- [16] Mehlatat M. K., Gupta P., Khaitan A. and Pedrycz W., "A hybrid intelligent approach to integrated fuzzy multiple depots capacitated green vehicle routing problem with split delivery and vehicle selection", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(6), 1155-1166, (2019).
- [17] Yu Y., Wang S., Wang J. and Huang, M., "A branch-and-price algorithm for the heterogeneous fleet green vehicle routing problem with time windows", *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 511-527, (2019).
- [18] Ren X., Huang H., Feng S. and Liang, G. "An improved variable neighborhood search for bi-objective mixed-energy fleet vehicle routing problem", *Journal of Cleaner Production*, 275, 124155, (2020).
- [19] Li Y., Soleimani H. and Zohal, M., "An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives", *Journal of Cleaner Production*, 227, 1161-1172, (2019).
- [20] Afshar-Bakeshloo M., Mehrabi A., Safari H., Maleki M. ve Jolai F., "A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria", *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 529-544, (2016).
- [21] Abdullahi H., Reyes-Rubiano L., Ouelhadj D., Faulin J. and Juan A. A., "Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, 292(1), 143-154, (2021).
- [22] Nyako S. I., Tayachi D. and Tagina M., "Minimizing fuel consumption in the time-dependent VRP", *In 2022 8th IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, May, 647-652, (2022).
- [23] Sun X., Dai X., Pan S., Bao N., Liu N. and Shi X., "A discrete teaching-learning-based optimization algorithm for the green vehicle routing problem", *23rd IEEE Int Conf on High Performance Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science and Systems; 19th Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud and Big Data Systems and Application*, 1552-1557, (2021).
- [24] Bruglieri M., Mancini S., Pezzella F. and Pisacane O., "A path-based solution approach for the green vehicle routing problem", *Computers and Operations Research*, 103, 109-122, (2019).
- [25] Matos M. R. S., Frota Y. and Ochi L. S. "Green vehicle routing and scheduling problem with split delivery", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 69, 13-20, (2018).
- [26] da Costa P. R. D. O., Mauceri S., Carroll P. and Pallonetto F., "A genetic algorithm for a green vehicle routing problem", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 65-74, (2018).
- [27] Jabir E., Panicker V. V. and Sridharan R., "Design and development of a hybrid ant colony-variable neighborhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 422-457, (2017).
- [28] Ferreira K. M., de Queiroz T. A. and Toledo F. M. B., "An exact approach for the green vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints and split delivery", *Computers and Operations Research*, 136, 105452, (2021).
- [29] Asghari M. and Al-e S. M. J. M., "Green vehicle routing problem: a state-of-the-art review", *International Journal of Production Economics*, 231, 107899, (2021).
- [30] Moghdani R., Salimifard K., Demir E. and Benyettou A., "The green vehicle routing problem: a systematic literature review", *Journal of Cleaner Production*, 279, 123691, (2021).
- [31] Qi R., Li J. Q., Wang J., Jin H. and Han Y. Y., "QMOEA: A q-learning-based multi-objective evolutionary

- algorithm for solving time-dependent green vehicle routing problems with time windows”, *Information Sciences*, 608, 178-201, (2022).
- [32] Barth M., Younglove T. and Scora, G., “Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model”, *US Berkley*, 124, (2005).
- [33] Bektaş T. and Laporte G., “The pollution-routing problem”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250, (2011).
- [34] Demir E., Bektaş T. and Laporte G., “An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346-359, (2012).
- [35] Franceschetti A., Honhon D., Van Woensel, T., Bektaş T. and Laporte G., “The time-dependent pollution-routing problem”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, 265-293, (2013).
- [36] Soysal M., Bloemhof-Ruwaard J. M. and Bektaş T., “The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations”, *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378, (2015).
- [37] Kısa T., Atıcı E. K. ve Ulucan A., “İki-aşamalı araç rotalama problemi: temel yaklaşımlar ve konvansiyonel araç rotalama problemi ile karşılaştırmalar”, *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40(2), 368-403, (2021).
- [38] Kılıç M. Y., Dönmez T. ve Adalı S., “Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955, (2021).
- [39] Kaplanseren B., Mercan B., Özdemir B., Kadioğlu H. H. and Çağrı S. E. L., “Araç rotalamada karbon ayak izi ve endüstriyel bir uygulama”, *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 239-252, (2019).
- [40] Düzakın E. ve Demircioğlu M., “Araç rotalama problemleri ve çözüm yöntemleri”, *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(1), (2009).