



Received: December 12, 2017
Accepted: February 02, 2018
Published Online: March 25, 2018

AJ ID: 2018.06.01.OR.04
DOI: 10.17093/alphanumeric.366852

An Ant Colony Optimization Algorithm Approach for Solving Multi-objective Capacitated Vehicle Routing Problem

Osman Pala *



Res. Assist. Department of Econometrics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Dokuz Eylul University, İzmir, Turkey, osman.pala@deu.edu.tr

Mehmet Aksaraylı, Ph.D.



Assoc. Prof., Department of Econometrics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Dokuz Eylul University, İzmir, Turkey, mehmet.aksarayli@deu.edu.tr

* Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Dokuzçesmeler Kampüsü, 24 Sokak No:2, 35160 Buca / İzmir Türkiye

ABSTRACT

In the transportation and logistics sector, the problem of vehicle routing is an important issue that needs to be addressed in many ways. The aim of the work is to minimize the total tour time and the average length of time that a passenger travels on by a service company that is carrying passengers between the hotel and the airport with their service vehicles. Due to the limitations of passenger transport in vehicles, the problem is dealt with as a Multi-objective Capacitated Vehicle Routing problem. An Ant Colony Optimization Algorithm which is a heuristic method is proposed for solving the problem. According to the results of the solution, it is observed that the proposed model provides significant improvements in terms of both parameters in terms of the duration of the tours and the duration of the average transportation time of the customers.

Keywords:

Multi-objective Optimization, Vehicle Routing Problem, Ant Colony Optimization Algorithm

Çok Amaçlı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi Çözümünde Bir Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması Yaklaşımı

ÖZ

Ulaşım ve lojistik sektöründe araç rotalama problemi çok yönlü ele alınması gereken önemli bir konudur. Çalışmanın amacı, ulaştırma sektöründe sahip olduğu servis araçlarıyla oteller ile havalimanı arası yolcu taşımacılığı yapan ve hala faaliyette bulunan bir firmanın toplam tur sürelerini ve bir yolcunun ortalama ulaşımında geçirdiği süreyi minimize etmektir. Araçlarda bulunan yolcu taşıma sınırlamaları nedeniyle problem Çok Amaçlı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama problemi olarak ele alınmıştır. Problemin çözümünde sezgisel bir yöntem olan Karınca Kolonisi Optimizasyonu Algoritması kullanılmıştır. Çözüm sonuçlarına göre turların süresi ve müşterilerin ortalama ulaşımında geçirdikleri süre açısından önerilen modelin her iki parametre açısından da önemli iyileştirmeler sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Çok Amaçlı Optimizasyon, Araç Rotalama problemi, Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması.



1. Giriş

Ulaşım ve lojistik sektörünün temel konularından biri taşımacılığın belirli kısıt ve koşullar altında optimizasyonudur. Ulaşım firmaları sadece toplam taşıma maliyetini minimize etmeye odaklanmamakta, aynı zamanda farklı amaçları gerçekleştirmek istemektedirler. Özellikle rekabetçi yapısını korumak isteyen firmalar müşteri memnuniyetini de önemsemektedir. Çalışmada ulaştırma sektöründe hala faaliyette bulunan bir firmanın belirli kapasiteye sahip servis araçlarıyla oteller ile havalimanı arası yolcu taşımacılığında tur güzergah sürelerini ve bir yolcunun ortalama ulaşımında geçirdiği süreyi minimize etmek hedeflenmiştir. Firma için tur süreleri kadar müşteri memnuniyeti de oldukça önemlidir. Problem Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak ele alınmıştır. Ulaşım sektöründe ARP kullanılan çalışmalara bakıldığında, Karagül ve Güngör (2014a) ve Karagül ve Güngör (2014b) çalışmalarında ulaşım sektöründeki bir firmanın ARP probleminde Genetik Algoritma ve Rastgele Arama Algoritması kullanmışlar ve sonuçlara bakıldığında Rastgele Arama Algoritmasının daha etkili çözümler sunabildiği gözlemlemiştir. López-Sánchez vd. (2014) okul servisi ulaşımında dengelenmiş açık ARP ile problemi modellemiş ve tanımladıkları çoklu başlangıç algoritması ile İspanya’da faaliyet gösteren uluslararası bir firmanın işçileri ev ve işyeri arasındaki ulaşım problemine etkin bir çözüm sunmuşlardır. Atan ve Şimşek (2017) çalışmalarında Ankara’da personel servis hizmeti sunan bir firmanın taşıdığı personelleri alacakları durakları ve servislerin güzergahları optimum tur uzunluklarına göre belirleme problemini doğrusal programlama yaklaşımı ile ele alarak firmanın taşımacılık maliyetlerinde önemli düşüşler sağlamışlardır. De Souza Lima vd. (2017) servis taşımacılığı alanında ARP’yi baz alarak öğrenciler için toplam ağırlıklandırılmış yolculuk süresi, sürücüler arasında tur dengelenmesi ve tur maliyetlerini birlikte ele alan çok amaçlı ARP modellemesi gerçekleştirmişler ve çözümünde dört farklı çok amaçlı yinelemeli yerel arama algoritması önermişlerdir. Kullandıkları değerlendirme metriklerine göre etkin çözüm gerçekleştirdiklerini öne sürmüşlerdir. Caceres vd. (2017) çalışmalarında öğrenciler tarafından stokastik kullanım talebine sahip okul servisi ulaştırma probleminde, toplam kullanılan araç sayısı ve toplam tur uzunluklarını minimize edecek bir model kullanmışlar ve ulaşım hizmeti sunan bir firmanın maliyetlerinde önemli azalışlar kaydetmişlerdir.

ARP, bir depoda bulunan k adet aracın en uygun k adet rotayı kullanarak farklı miktarlardaki malları n adet noktaya dağıtması ve depoya geri dönmesi olarak açıklamak mümkündür. En uygun k adet rota, rotaların olabilecek en kısa toplam tur uzunluğuna sahip olması için seçilen rotalardan oluşmaktadır. ARP ilk olarak Dantzig ve Ramser (1959) tarafından geliştirilmiş Gezgin Satıcı Problemi (GSP) olarak ifade edilmiştir. ARP’nin GSP’den temel farkı başlangıç ve bitiş yerinin belirli olmasıdır. Kapasite Kısıtlı ARP (KKARP) ise problemde depodan çıkan her bir aracın belirli mesafe veya dağıtım kapasitesi olması halidir. Talepleri bilinen müşterilere sadece bir defa uğranması gereken KKARP’de amaç, toplam hizmet maliyetini (Toth ve Vigo, 2002) veya araçların toplam tur uzunluğunu minimize etmektir (Lin vd., 2009). ARP’de birden fazla amaç optimize edilmek istendiğinde problem Çok Amaçlı ARP (ÇAARP) olarak ele alınmaktadır. ÇAARP detaylı bir şekilde Jozefowicz vd. (2008) tarafından incelenmiştir. Amaçlardan bir tanesi genellikle toplam tur minimizasyonu olurken diğer amaçlar ise, k adet rota uzunluklarının varyansını minimize etmek, en çok müşteriye ulaşabilmek ve müşteri bekleme sürelerini minimize etmek gibi probleme özgü çeşitli ek amaçlardan oluşabilmektedir. Çözüm yöntemleri ise çoğunlukla Pareto yaklaşımı,

hedef programlama ve ağırlıklı toplam yöntemi gibi problemin çok amaçlı yapısını kavrayan metotların sezgisel algoritmalarla hibritleşmesinden oluşmaktadır. ÇAARP ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Ghannadpour vd. (2014) Genetik Algoritma ile ÇAARP'de toplam kullanılan araç sayısı, müşterilerin taleplerinin karşılanma süresi ve toplam tur uzunluğu gibi amaç fonksiyonları için geliştirdikleri modeli etkin bir şekilde çözmüşlerdir. Lahyani vd. (2015) çalışmalarında gerçek hayat problemlerini ele alan ARP modellerini zengin ARP olarak tanımlamış ve bu kapsamdaki çalışmalarını incelemiştir. En çok kullanılan amaç fonksiyonları olarak toplam tur uzunluğu, toplam süre, toplam tur maliyeti, araç sayısı, servis kalitesi ve toplam kar olarak nitelemiştir. Halvorsen-Weare ve Savelsbergh (2016) çalışmalarında KKARP modelinde toplam tur uzunluğuna ek olarak her bir aracın tur uzunlukları arasındaki dengeyi birlikte optimize etmişlerdir. Kesin çözüm veren matematiksel model ile amaç fonksiyonları için Pareto sınırı elde etmişlerdir. Chávez vd. (2016) ÇAARP modelinde Karınca Kolonisi Algoritması ile tur uzunlukları, süreleri ve kullanılan enerji amaç fonksiyonları için Pareto sınır çözüm kümelerini bulmuşlardır. Sedighzadeh ve Mazaheripour (2017) ÇAARP modeli için Yapay Arı Kolonisi ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmalarını bütünleşik bir yapıda kullanarak toplam maliyet, toplam süre, kullanılan araç ve müşterilere hizmet zaman aralıklarını birlikte optimize etmişlerdir. Matl vd. (2017) ÇAARP modelinin çözümünde kullanılan eşitlik fonksiyonlarının Pareto optimal bulmadaki performanslarını incelemiştir. Kullanılan fonksiyonların istenmeyen çözümler üretebildiğini teorik bir bakış açısıyla açıklamışlardır.

Ekşioğlu, Vural ve Reisman (2009) tarafından yapılan ARP literatür derlemesinde problemin NP-zor olması nedeniyle genellikle sezgisel algoritmalar ile çözüldükleri gözlenmiştir. En sık kullanılanlardan bir tanesi ise Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) olarak ifade edilmektedir. Probleme uyarlanabilir ve etkili çözüm vermesi nedeniyle çalışmada KKO kullanılmıştır.

KKO'nun çok sayıda farklı türevi bulunmaktadır. Dorigo vd. (1996) tarafından önerilen ve bir Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) türevi olan Karınca Sistemi (KS) ile GSP çözümünde oldukça önemli iyileştirmeler sağlanmıştır (Gambardella ve Dorigo, 1996). Dorigo ve Gambardella (1997) KKO için global feromon güncellenmesine sahip Karınca Kolonisi Sistemi (KKS) önermişlerdir. Dorigo ve Blum (2005) yaptıkları çalışmada KKO ile yapılan çalışmaları problem ve algoritma tipleri açısından detaylı incelemiştir.

Çalışmada ele aldığımız problem toplam tur süresini ve bir müşterinin ortalama yolda geçirdiği süreyi birlikte minimize etmeyi amaçladığı ve servis araçlarının kısıtlı kapasiteye sahip olduğu için Çok Amaçlı Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (ÇAKKARP) olarak ifade edilebilir. Problemden firma tarafından hedeflenen iki amaç olduğu için bu amaçları birlikte optimize etmek için Bulanık Hedef Programlama (BHP) kullanılmıştır. Tur süresi ve bir müşterinin ortalama yolda geçirdiği süre bulanık hedefler olarak ele alınmıştır. BHP'nin Hedef Programlama'dan ayrılan yanı bulanık hedefler içeren modelde hedef değeri ve tolerans limiti birlikte kullanılmakta ve hedef bulanık küme fonksiyonları ile ifade edilebilmektedir. Bu sayede hedeften sapmalara belirli bir büyüklüğe kadar izin verilmekte ve hedef normalizasyonuna gerek kalmamaktadır. Tiwari vd. (1987) tarafından yapılan çalışmada, bulanık hedeflere ait toplam doyum derecesini maksimize etmeye çalışarak BHP'ye önemli bir katkıda bulunmuşlardır.

Çalışmada öncelikle firma tarafından onaylı senaryolar sadece tur minimizasyonu için KKO ile 30'ar kez çözülmüş ve çıkan tur ve ortalama yolda geçirilen süre değerlerinden bulanık hedef parametre değerleri elde edilmiştir. Sonrasında KKO tekrar bulanık hedefleri optimize etmek için çalıştırılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Çalışmanın geri kalan kısmında kullanılan KKO algoritması ve BHP ile önerilen bütünleşik yaklaşım aktarılmış ve uygulama kısmında senaryolardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuç kısmında çalışmanın etkisi ve gelecekte yapılabilecekler değerlendirilmiştir.

2. Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması

Dorigo (1992) karıncaların besin bulma ve kolonilerine taşımalarından esinlenerek ortaya koyduğu KKO algoritması kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde oldukça sıklıkla kullanılan bir sezgisel yöntem olmuştur. Karıncalar geçtikleri yollara feromon izleri bırakmakta ve belirli oranda feromonlar buharlaşarak birim zamanda daha az karınca geçen uzun yollarda feromonlar daha az bulunmaktadır. Yol seçiminde feromon miktarını önemseyen karıncalar daha çok feromon bulunan yolları yeni seçimlerinde tercih etmektedirler.

Dorigo (1992) iki nokta arası feromon iz miktarına ayrıca noktalar arası uzaklığı ekleyerek bir karıncanın hangi yolu seçmesi gerektiğini belirlemiştir. Karıncaların bir sonraki adımda hangi yola gideceğini belirleyen olasılık değeri KS için aşağıdaki gibidir (Dorigo vd., 1996: 6).

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in N_i^k} [\tau_{ik}]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad \text{eger } j \in N_i^k \quad (1)$$

Eşitlik 1'de j noktaları daha önceden tur içerisinde k karıncası tarafından ziyaret edilmemiş noktalardan oluşmaktadır. Buna göre daha büyük feromon ve görünürlük değeri toplamına sahip yol en çok olasılıkla seçilmektedir. Eşitlik 1'de yer alan ifadeler ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$j \in N_i^k$: k. karıncanın gidebileceği tüm j noktaları.

$k \in N_i^k$: i. noktada bulunan tüm karıncalar.

P_{ij}^k : k. karıncanın i. noktadan j noktasına geçme olasılığı

τ_{ij} : i ve j noktaları arasındaki feromon değeri

η_{ij} : i ve j noktaları arasındaki görünürlük değeri

α : feromon katsayısı

β : görünürlük katsayısı

N : noktalar kümesi

KS'de turlar sonunda yollardaki feromon izleri aşağıdaki Eşitlik 2 yardımıyla güncellenmektedir (Dorigo vd. 1996: 5).

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (2)$$

burada $(1-\rho)$ yoldaki feromon buharlaşma oranı olup i-j noktaları arasına eklenen feromon miktarı ise Eşitlik 3'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3)$$

burada $\Delta \tau_{ij}^k$ k. karıncanın i ve j noktaları arasına bıraktığı feromon miktarıdır ve aşağıdaki gibi Eşitlik 4'de hesaplanmaktadır.

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{eger i-j yolunu kullanırsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4)$$

burada Q sabit bir değer olup L_k k. karıncanın tur uzunluğudur.

Dorigo ve Gambardella (1997) geliştirdikleri KKS ile her bir iterasyon sonucunda en iyi tur değerine sahip karıncanın geçtiği yolda global feromon güncellemesi yaparak karıncaların en iyiye doğru yönelmesini sağlamış ve koloni arasındaki sosyal ilişkiyi arttırmışlardır. KKS ile KKO'ya yeni bir geçiş kuralı ve global feromon güncellemesi getirmişlerdir. Buna göre Eşitlik 5'de geçiş kuralı verilmektedir.

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in N_i^k} \{ [\tau_{iu}]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta \} & \text{eger } q < q_0 \\ J & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5)$$

Burada q, 0 ile 1 arasında rassal bir sayı ve q_0 ise 0 ile 1 aralığında önceden belirlenmiş bir sabittir. Eşitlik 5'de q, q_0 'dan küçük iken maksimum feromon ve görünürlük bileşimine sahip yol seçilirken büyük eşit olduğu J'de ise Eşitlik 1'e göre seçim yapılmaktadır.

Elde edilmiş en iyi tur için KKS'de ekstra olarak global feromon güncellenmesi Eşitlik 6'daki gibi yapılmaktadır.

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (6)$$

burada $(1-\rho)$ feromon buharlaşma oranı olup i-j noktaları arasına eklenen feromon izi ise Eşitlik 7'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{LB_k} & \text{eger i-j yolunu kullanırsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7)$$

Burada LBk global en iyi turu ifade etmektedir.

Çalışmada KS algoritmasındaki feromon güncellenmesine değişiklik yaparak iterasyonun en iyi turuna daha çok feromon izi bırakabilmek için Eşitlik 4 yerine

aşağıdaki Eşitlik 8 kullanılarak yeni iyi çözümlerin feromon miktarı daha çok arttırılmıştır.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k - ib(L_{kib})} & \text{eger } i\text{-}j \text{ yolunu kullanırsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (8)$$

Burada ib 0 dan büyük 1'den küçük belirlenebilen, son iterasyondaki en iyi turu ağırlıklandırma katsayısıdır. Son iterasyondaki en iyi turda bulunan yollara aktarılan feromonu daha çok arttırabilmek için ib 1'e yakın tercih edilmelidir. Parametre ib , 0 değerini aldığıında feromon güncellemesi KS ile aynı olmaktadır. Çalışmada ib değeri yapılan denemeler sonucunda 0.97 tercih edilmiştir. Bu sayede son keşfedilen yollara olan karıncaların ilgileri arttırılabilmektedir.

3. Bulanık Hedef Programlama

Tiwari vd. (1987) çalışmalarında bulanık hedeflerin toplam doyurulmasına odaklanarak her birinin farklı düzeylerde gerçekleşmesine olanak veren toplamsal model yaklaşımını önermişlerdir. Zimmermann tipi üyelik fonksiyonlarından oluşan ve farklı parametre değerlerine sahip bulanık hedefler aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir (Özkan, 2003: 210).

$$(Ax)_i \lesseqgtr b_i \Rightarrow \mu_i = \begin{cases} 0 & , \text{ eger } (Ax)_i \geq b_i + d_i \text{ ise} \\ 1 - \frac{(Ax)_i - b_i}{d_i} & , \text{ eger } b_i \leq (Ax)_i \leq b_i + d_i \text{ ise} \\ 1 & , \text{ eger } (Ax)_i \leq b_i \text{ ise} \end{cases}$$

$$(Ax)_i \gtrreq b_i \Rightarrow \mu_i = \begin{cases} 0 & , \text{ eger } (Ax)_i \leq b_i - d_i \text{ ise} \\ 1 - \frac{b_i - (Ax)_i}{d_i} & , \text{ eger } b_i - d_i \leq (Ax)_i \leq b_i \text{ ise} \\ 1 & , \text{ eger } (Ax)_i \geq b_i \text{ ise} \end{cases}$$

$$x_i, \mu_i \geq 0$$

Yukarıda verilmiş olan bulanık hedeflere ilişkin BHP toplamsal model, bulanık hedeflere ait üyelik değerlerinin toplamı şeklinde amaç fonksiyonu ve bulanık hedef kısıtları ile aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Özkan, 2003: 211).

$$\text{Maksimum } V(\mu) \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i$$

Kisitlayıcılar

$$\mu_i = 1 - \frac{(Ax)_i - b_i}{d_i}$$

$$\mu_i = 1 - 1 - \frac{b_i - (Ax)_i}{d_i} \quad (i = m_1, \dots, m_n)$$

$$x_i, \mu_i \geq 0$$

Yukarıdaki modelde, ω_i bulanık hedeflere atanan ağırlık değerlerini belirtir. μ_i bulanık hedefin doyurulma derecesini ifade etmektedir. b_i hedef değer, d_i ise tolerans aralığını belirtir. Kısıtlayıcı $(Ax)_i \leq b_i$ şeklinde olduğunda tolerans limiti $b_i + d_i$, kısıtlayıcı $(Ax)_i \geq b_i$ şeklinde ise tolerans limiti $b_i - d_i$ ile hesaplanır.

4. Uygulama

Çalışmada, sahip olduğu servis araçlarıyla altmış adet otele hizmet veren bir ulaşım firması için önceden belirli oteller ve bu otellerden havalimanına gidecek müşteri sayılarına göre firma-oteller-havalimanı arasında yapılacak turların güzergahlarını, toplam tur uzunluğu ve bir müşterinin yolda geçirdiği ortalama süreyi birlikte minimize edecek şekilde belirleme amaçlanmıştır. Buna göre tura dair hedef bulanık tur hedefi, bir müşterinin ortalama yolda geçirdiği süreye dair hedef ise bulanık müşteri hedefi olarak adlandırılmıştır.

Firmadan alınan bilgiler doğrultusunda genellikle bir otelden maksimum 4 yolcu alındığı ve bir tur planında 10 ile 15 civarında otel bulunduğu ifade edilmiştir. Buna göre 10 otel için maksimum 30 yolcu içeren 20 plan ve 15 otel için maksimum 45 yolcu içeren 20 plan oluşturulmuştur. Firmanın araçlarının yolcu kapasitesi eşit ve 15 kişiliktir. Buna göre simülasyon yoluyla 10 ve 15 otelli 20'şer adet tur planı oluşturulmuş ve firmanın ilgili turlar için kendi oluşturdukları rotalar temin edilmiştir.

Problem ilk önce KKARP olarak en kısa turları bulma amaçlı sadece KS algoritması ile 30'ar kez çözülmüştür. Buradan elde edilen en iyi tur uzunlukları ve müşteri süreleri hedef değerler, en kötü tur uzunlukları ve müşteri süreleri ise tolerans limitleri olarak ele alınıp her bir plan için bulanık hedef değerler belirlenmiştir. Problem sonrasında ÇAKKARP olarak KS algoritmasında amaç fonksiyonu olarak BHP'den elde edilen amaç fonksiyonunun kullanılması ve KS feromon güncellenmesinde Eşitlik 8 yerine aşağıdaki Eşitlik 9 kullanılarak çözülmüştür.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{bib(\max\{\mu_a^k + \mu_b^k\}) - (\mu_a^k + \mu_b^k)} & \text{eger i-j yolunu kullanırsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (9)$$

Burada μ_a^k k. karıncanın elde ettiği tur değerinin bulanık tur hedefi üyelik derecesi, μ_b^k ise k. karıncanın elde ettiği turda bir müşterinin ortalama yolda geçirdiği sürenin bulanık müşteri hedefi üyelik derecesidir. Q feromon sabiti, bib ise turlara feromon eklenirken bulanık hedef değerlerine göre ayıran parametredir. İlgili parametrenin kullanımı ile bulanık hedef değerleri yüksek olan turlardaki yollara daha çok feromon eklenmektedir. Çalışmada denemeler sonunda $Q=0.001$ ve $bib=1.05$ değerleri kullanılmıştır.

KKARP ve ÇAKKARP modellerinde bulunan fonksiyonlarda yer alan değişken ve parametreler ise aşağıda listelenmiştir.

k_{ij} : i. noktadan j. noktaya geçiş yapan müşteri sayısı

x_{ij} : i. noktadan j. noktaya geçiş yapılması.

C_{ij} : i. noktadan j. noktaya geçiş süresi.

Q : Araç kapasitesi.

m : Araç sayısı.

q_i : i . oteldeki müşteri sayısı.

u_i : i . otel öncesi araçta kalan kapasite.

Modellerde yer alan ve amaç fonksiyonu olan $f(1)$ toplam tur süresi minimizasyonunu hedeflemektedir. Diğer amaç fonksiyonu olan $f(2)$ ise müşterilerin ortalama yolda geçirdiği süreyi minimize etmeyi amaçlamaktadır. Araç sayısı m kadar firmadan çıkış olması gerektiği $cf(1)$ ile ifade edilmiştir. Araç sayısı m kadar havalimanına geliş olması gerektiği $cf(2)$ ile ifade edilmiştir. Her bir otelden j . otele sadece 1 kere geçiş yapılmasına $cf(3)$ ile izin verilmiştir. Herhangi i . otelden her bir otele sadece 1 kere geçiş yapılmasına $cf(4)$ ile izin verilmiştir. Kapasite ve alt tur eleme için $cf(5)$ ve $cf(6)$ kullanılmıştır. Araç sayısını minimumda tutmak için ekstra olarak $cf(7)$ modele dahil edilmiştir. Karar değişkenlerinin 0-1 tam sayı alması $cf(8)$ ile sağlanmıştır. Toplam tur süresi bulanık hedefleri ise $cf(9)$ ve $cf(10)$ ile ifade edilmiş ve bulanık hedef üyelik değerlerinin negatif olmama durumu ise $cf(11)$ ile belirtilmiştir.

$$\text{Min } f(1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Min } f(2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} x_{ij}$$

KKARP modeli:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f(1): \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \\ \text{kisit _ fonksiyonları;} \\ \text{cf(1): } \sum_{j=2}^{n-1} x_{1j} = m \\ \text{cf(2): } \sum_{i=2}^{n-1} x_{in} = m \\ \text{cf(3): } \sum_{i=2}^{n-1} x_{ij} = 1, (j = 2, \dots, n-1, i \neq j) \\ \text{cf(4): } \sum_{j=2}^n x_{ij} = 1, (i = 2, \dots, n-1, i \neq j) \\ \text{cf(5): } u_i - u_j + Qx_{ij} \leq Q - q_j, (i, j = 2, \dots, n-1, i \neq j) \\ \text{cf(6): } q_i \leq u_i \leq Q, (i = 2, \dots, n-1) \\ \text{cf(7): } 1 \leq m \leq \left(\frac{1}{Q} \sum_{i=2}^{n-1} q_i \right) + 0.999999 \quad (m \in \mathbb{Z}^+) \\ \text{cf(8): } x_{ij} = 0 \text{ veya } 1, (i, j = 1, \dots, n, i \neq j) \end{array} \right.$$

KKARP modelinin her bir plan için KS ile 30'ar kez çözümüyle elde edilen $f(1)^*$ ve $f(2)^*$ en iyi sonuçları, $f(1)$ - ve $f(2)$ - en kötü sonuçları sırasıyla amaç fonksiyonları $f(1)$ ve $f(2)$

için ifade etmektedir. Aşağıdaki ÇAKKARP modelinde $f(1)^*$ ve $f(2)^*$ ideal hedef değerler olarak, $f(1)^-$ ve $f(2)^-$ tolerans limiti olarak kullanılmıştır.

ÇAKKARP Modeli:

$$P(2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Max } Z = \mu_1 + \mu_2 \\ \text{kısıtlar; } cf(1), \dots, cf(8) \\ cf(9) : f(1) - (f(1)^* - f(1)^-) \mu_1 = f(1)^- \\ cf(10) : f(2) - (f(2)^* - f(2)^-) \mu_2 = f(2)^- \\ cf(11) : \mu_i \geq 0 \end{array} \right.$$

Firmanın uygun gördüğü 10 otel ve 15 otel içeren 20'şer senaryo hem KKARP ile çözülmüş ve buradan elde edilen amaç fonksiyon parametreleri ile ÇAKKARP yaklaşımıyla tekrar çözülmüştür. Ayrıca firmanın kendi planlamacılarından ilgili senaryolarda oluşturacakları planlar temin edilmiştir.

10 otelli 20 plan için firmadan temin edilen kendi programlama planları, KKARP ve ÇAKKARP sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de tur süresi (TS) ve yolcu süresi (YS), dakika cinsinden verilmiştir. İki model arası tur süreleri için tasarruf oranı farkı (tf), iki model arası yolcuların ortalama yolculuk süreleri için tasarruf oranı farkı (yf) olarak adlandırılmıştır ve oransal olarak verilmiştir. Buna göre ÇAKKARP modeli ile, KKARP'a göre ortalama %0.2 daha uzun, firmanın planına göre ise ortalama %7.1 daha kısa turlar bulunmuştur. Müşterilerin memnuniyetini arttıran bir etken olan ortalama yolda geçirdikleri süreler kıyaslandığında ÇAKKARP, KKARP'a göre ortalama %0.06 ve firmanın planına göre ortalama % 2.5 daha kısa süreler elde etmiştir. ÇAKKARP 10 otelli planlar için KKARP'e göre tur süresinde kötüleşmeye sebep vermeden 9 planda ortalama yolculuk sürelerinde iyileştirme sağlamıştır. 3 planda ise KKARP'a göre tur sürelerinde artışlarla ortalama yolculuk sürelerinde iyileştirme sağlayabilmiştir.

10 OTEL	Çakkarp-TS	Çakkarp-YS	Kkarp-TS	Kkarp-YS	Firma-TS	Firma-YS	Çakkarp-Kkarp-tf	Çakkarp-Kkarp-yf	Çakkarp-Firma-tf	Çakkarp-Firma-yf
1	149	58.546	149	58.546	155	60.136	0.000	0.000	0.039	0.026
2	151	59.172	152	60.483	158	61.690	0.007	0.022	0.044	0.041
3	149	56.769	149	56.769	157	58.308	0.000	0.000	0.051	0.026
4	172	62.000	168	64.778	174	62.556	-0.024	0.043	0.011	0.009
5	178	59.500	178	59.625	186	62.125	0.000	0.002	0.043	0.042
6	175	66.793	174	65.862	181	64.621	-0.006	-0.014	0.033	-0.034
7	161	55.600	161	55.920	162	55.960	0.000	0.006	0.006	0.006
8	163	59.652	163	61.000	169	63.696	0.000	0.022	0.036	0.063
9	154	59.583	154	59.208	160	59.542	0.000	-0.006	0.038	-0.001
10	168	58.200	168	58.650	178	61.350	0.000	0.008	0.056	0.051
11	158	57.273	158	57.409	160	58.364	0.000	0.002	0.013	0.019
12	202	63.852	200	64.519	220	65.704	-0.010	0.010	0.082	0.028
13	176	64.640	176	64.640	203	66.160	0.000	0.000	0.133	0.023
14	170	66.167	170	66.167	221	68.944	0.000	0.000	0.231	0.040
15	172	64.069	172	64.103	189	63.793	0.000	0.001	0.090	-0.004
16	170	59.833	169	60.083	220	63.917	-0.006	0.004	0.227	0.064

10 OTEL	Çakkarp-TS	Çakkarp-YS	Kkarp-TS	Kkarp-YS	Firma-TS	Firma-YS	Çakkarp-Kkarp-tf	Çakkarp-Kkarp-yf	Çakkarp-Firma-tf	Çakkarp-Firma-yf
17	164	66.480	164	66.320	183	66.680	0.000	-0.002	0.104	0.003
18	145	56.200	145	57.000	163	58.550	0.000	0.014	0.110	0.040
19	168	56.500	168	56.577	170	58.731	0.000	0.001	0.012	0.038
20	169	59.625	169	60.542	179	60.458	0.000	0.015	0.056	0.014
ORT.	165.7	60.523	165.35	60.910	179.4	62.064	-0.002	0.006	0.071	0.025

Tablo 1. 10 Otel için ÇAKKARP-KKARP-Firma Tur Sonuçları

15 otelli 20 plan için firmadan temin edilen, KKARP ve ÇAKKARP sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’deki sonuçlara göre ÇAKKARP modeli kullanılarak KKARP’a göre ortalama % 0.7 daha uzun, firmanın planına göre ortalama % 7.2 daha kısa turlar bulunmuştur. Ortalama yolda geçirdikleri süreler kıyaslandığında ÇAKKARP, KKARP’a göre ortalama % 1.1 ve firmanın planına göre ortalama % 1.9 daha kısa süreler elde etmiştir. Sonuçlara göre ÇAKKARP, KKARP’a göre az da olsa tur sürelerini uzatarak daha fazla yolcularını tatmin edecek şekilde yolculuk sürelerini kısaltmayı başarabilmiştir. ÇAKKARP 15 otelli planlar için KKARP’e göre tur süresinde kötüleşmeye sebep vermeden 7 planda ortalama yolculuk sürelerinde iyileştirme sağlamıştır. 9 planda ise KKARP’a göre tur sürelerinde artışlarla ortalama yolculuk sürelerinde iyileştirme sağlayabilmiştir.

15 OTEL	Çakkarp-TS	Çakkarp-YS	Kkarp-TS	Kkarp-YS	Firma-TS	Firma-YS	Çakkarp-Kkarp-tf	Çakkarp-Kkarp-yf	Çakkarp-Firma-tf	Çakkarp-Firma-yf
1	258	64.231	255	66.333	270	66.231	-0.012	0.032	0.044	0.030
2	266	64.343	261	64.771	302	64.686	-0.019	0.007	0.119	0.005
3	263	62.625	261	62.688	275	63.969	-0.008	0.001	0.044	0.021
4	218	55.256	218	55.769	281	59.205	0.000	0.009	0.224	0.067
5	232	59.143	232	61.114	276	59.457	0.000	0.032	0.159	0.005
6	244	58.833	241	59.083	264	60.556	-0.012	0.004	0.076	0.028
7	254	63.543	254	63.514	269	64.029	0.000	0.000	0.056	0.008
8	231	56.105	231	56.553	257	58.868	0.000	0.008	0.101	0.047
9	235	58.290	235	58.447	241	59.184	0.000	0.003	0.025	0.015
10	240	58.865	241	59.297	266	60.054	0.004	0.007	0.098	0.020
11	262	62.514	261	62.114	277	62.429	-0.004	-0.006	0.054	-0.001
12	258	59.714	254	60.314	292	60.514	-0.016	0.010	0.116	0.013
13	254	62.947	250	64.500	260	63.553	-0.016	0.024	0.023	0.010
14	238	60.756	238	60.902	254	63.585	0.000	0.002	0.063	0.044
15	241	58.650	240	58.550	264	60.800	-0.004	-0.002	0.087	0.035
16	260	61.523	260	60.705	263	61.682	0.000	-0.013	0.011	0.003
17	246	60.871	241	62.097	257	60.774	-0.021	0.020	0.043	-0.002
18	245	59.343	246	60.086	264	59.029	0.004	0.012	0.072	-0.005
19	268	63.220	262	64.268	273	64.683	-0.023	0.016	0.018	0.023
20	260	62.439	257	65.829	264	63.707	-0.012	0.052	0.015	0.020
ORT.	248.65	60.661	246.9	61.347	268.45	61.850	-0.007	0.011	0.072	0.019

Tablo 2. 15 Otel için ÇAKKARP-KKARP-Firma Tur Sonuçları

5. Sonuç

Çalışmada ÇAKKARP modeli ile firma daha az tur sürelerine kavuşmuştur. Bununla birlikte gün içerisinde daha fazla tur yapma şansının olması nedeniyle günlük toplam taşıma kapasitesine etkisi olumlu olmuştur. Bir yolcunun ortalama ulaşımda geçirdiği sürede meydana gelen azalış ile firmaya karşı duyulan memnuniyet artmıştır. Tur ve yolcuların yolda geçirdikleri süre azalışı birlikte yakıt maliyetlerinde azalış meydana getirmiştir. KKO ile oluşturulan turlar firmanın tur planlama süresini oldukça azaltmış ve işgücü verimliliği olumlu etkide bulunmuştur. Gelecek çalışmalarda farklı sezgisel algoritmaların, farklı amaçlar ve kısıtlar ile problemin çözümünde ele alınması planlanmaktadır.

Kaynakça

- Atan, M., ve Şimşek, P. (2017). Doğrusal Programlama İle Araç Atama Probleminin Çözülmesi. Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 4(11), 339-358.
- Caceres, H., Batta, R., ve He, Q. (2017). School bus routing with stochastic demand and duration constraints. *Transportation Science*, 51(4), 1349-1364.
- Chávez, J., Escobar, J., ve Echeverri, M. (2016). A multi-objective Pareto ant colony algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing problem with Backhauls. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 35-48.
- Dantzig, G. B., ve Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- De Souza Lima, F. M., Pereira, D. S., da Conceição, S. V., & de Camargo, R. S. (2017). A multi-objective capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet and mixed loads. *4OR*, 15(4), 359-386.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., ve Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41.
- Dorigo, M., ve Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical computer science*, 344(2-3), 243-278.
- Dorigo, M., ve Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1), 53-66.
- Ekşioğlu, B., Vural, A. V., ve Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- Gambardella, L. M., ve Dorigo, M. (1996, May). Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. In *Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on* (pp. 622-627). IEEE.
- Ghannadpour, S. F., Noori, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., ve Ghoseiri, K. (2014). A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application. *Applied Soft Computing*, 14, 504-527.
- Halvorsen-Weare, E. E., ve Savelsbergh, M. W. (2016). The bi-objective mixed capacitated general routing problem with different route balance criteria. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 451-465.
- Jozefowicz, N., Semet, F., ve Talbi, E. G. (2008). Multi-objective vehicle routing problems. *European journal of operational research*, 189(2), 293-309.
- Karagül, K., ve Güngör, İ. (2014a). Havalimanından Otellere Tek Tip Araçlarla Turist Dağıtım Problemine Çözüm Önerisi Ve Alanya Uygulaması. *Dumlupınar University Journal Of Social Science*. 189-196.

- Karagül, K., ve Güngör, İ. (2014b). A case study of heterogeneous fleet vehicle routing problem: Touristic distribution application in Alanya. *An International Journal of Optimization and Control*, 4(2), 67.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., ve Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1-14.
- Lin, S. W., Lee, Z. J., Ying, K. C., ve Lee, C. Y. (2009). Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1505-1512.
- López-Sánchez, A. D., Hernández-Díaz, A. G., Vigo, D., Caballero, R., ve Molina, J. (2014). A multi-start algorithm for a balanced real-world Open Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 104-113.
- Matl, P., Hartl, R. F., ve Vidal, T. (2017). Workload equity in vehicle routing problems: A survey and analysis. *Transportation Science*. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0744>.
- Özkan, M.M. (2003). *Bulanık Hedef Programlama*. Bursa: Ekin Kitapevi.
- Sedighzadeh, D., ve Mazaheripour, H. (2017). Optimization of multi objective vehicle routing problem using a new hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm considering Precedence constraints. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.09.006>
- Tiwari, R.N., Dharmar, S. ve Rao, J.R. (1987). "Fuzzy Goal Programming- An Additive Model", *Fuzzy Sets and Systems*, 24:27-34.
- Toth, P., ve Vigo, D. (2002). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 123(1), 487-512.