



## Seçici Kümelenirilmiş Gezgin Satıcı Problemi ve Matematiksel Formülasyonları

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 29.09.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

### Selective Clustered Traveling Salesman Problem and Mathematical Formulations

Tusan DERYA , Esra DİNLER\* , Barış KEÇECİ 

Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Kümelenirilmiş gezgin satıcı problemi (KGSP), gezgin satıcı probleminin (GSP) bir uzantısıdır ve tüm düğümler kesişimleri boş küme olan kümeler bölünerek her küme bir turda mutlaka bir kez ziyaret edilmelidir. Ayrıca uğranan her kümede bulunan tüm düğümler mutlaka ziyaret edilmelidir. Bu çalışmada, KGSP'nin genel bir uzantısı olan Seçici Kümelenirilmiş GSP (SKGSP) tanımlanmaktadır. SKGSP'de amaç, belirli bir zaman kısıtı içerisinde en büyük toplam kazancı elde edecek şekilde kümelerin seçilerek ziyaret edilecek düğüm sırasının bulunmasıdır. Problemden, gezgin eğer bir kümeyi ziyaret edecek ise küme içindeki tüm düğümleri ziyaret etmelidir. Bu problem, küme seçimi ve seçilen kümelerde düğümler arasındaki en kısa yolun belirlenmesi karar problemlerini birlikte içerir. Çalışmada, SKGSP tanımı ve ilgili problem için yeni formülasyonlar önerilmektedir. Formülasyonların performansı, 52 test probleminden türetilmiş 416 problem üzerinde denenerek sonuçlara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kümelenirilmiş gezgin satıcı problemi; Oryantiring problemi; Kâr getirili gezgin satıcı problemi; Karma tamsayılı matematiksel modelleme

#### Abstract

The Clustered Traveling Salesman Problem (CTSP) is an extension of the Traveling Salesman Problem (GSP). All nodes must be divided into clusters that whose intersections are empty sets, and each cluster must be visited once in a tour. In addition, all nodes in each cluster must be visited. In this study, Selective Clustered TSP (SCTSP), which is a general extension of CTSP, is defined. The aim of SCTSP is to find the order of nodes to be visited by selecting clusters to obtain the largest total profit within a certain time limit. In the problem, if the traveler is to visit a cluster, it must visit all nodes in the cluster. This problem includes cluster selection and determination of the shortest path between nodes in selected clusters. In this study, the SCTSP is defined and new formulations are proposed for this problem. The performance of the formulations is tested on 416 problems derived from 52 test problems and the results are included.

**Keywords:** Clustered traveling salesman problem; Orienteering problem; Traveling salesman problem with profits; Mixed integer mathematical programming.

#### 1. Giriş

Tüm müşterilere hizmet verilmesinin gerekmediği kâr getirili rotalama problemleri sınıfı, klasik rotalama problemlerinden farklıdır. Her müşteri ile ilişkili bir kâr değeri vardır ve ziyaret edilen müşterilerden elde edilen toplam kâr enbüyüklenirken, tüm kısıtları sağlayan doğru müşteri grubuna hizmet verilmelidir. Kâr getirili rotalama problemleri alanında, Kâr getirili

Gezgin Satıcı Problemi (KGGSP), tek bir gezginin bulunduğu problemlerdir. Problemden dikkate alınan kısıtlamalara ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak, KGGSP'ler üç kategoriye ayrılır (Feillet vd. 2005): Oryantiring Problemi (OP) (Seçici Gezgin Satıcı Problemi-SGSP); Ödül Toplayan GSP (ÖGSP); ve Kârlı Tur Problemi (KTP).

OP'de amaç, toplam kârın enbüyüklenmesi ve belirli bir seyahat süresini aşmadan hangi müşteri alt kümesinin

hangi sırayla ziyaret edileceğinin belirlenmesidir (Derya vd. 2020, Golden vd. 1987, Verbeek vd. 2016). Problem ilk olarak Tsiligirides (1984) tarafından ortaya atılmıştır. OP hakkındaki kapsamlı ve detaylı çalışmalar Vansteenwegen vd. (2011) ile Gunawan vd. (2016) makalelerinde verilmiştir.

ÖGSP, bir gezginin ziyaret edilen her müşteri için kâr topladığı ve ziyaret edilmeyen her müşteri için bir ceza ödediği problemdir. Amaç, her müşteriyi en fazla bir kez ziyaret eden seyahat maliyetleri ve cezaların toplamını enküçükleme ve önceden belirlenmiş bir düzeyden daha az olmamak üzere toplam kâr elde etmektir (Pedro vd. 2013). Problem ilk olarak Balas (1989) tarafından Carnegie Mellon Üniversitesi'nde ele alınmıştır. Bu problem, bir çelik haddehanesinin günlük çizelgelemesi için modelleme çalışmasının sonucunda ortaya atılmıştır.

KTP ise toplam kâr ile seyahat maliyeti arasındaki farkı enbüyükleyen turu bulma problemdir. Problemin ilk

tanımı Dell'Amico vd. (1995) tarafından verilmiştir. Sonraki yıllarda Archetti vd. (2013) ile Jepsen vd. (2014) problem için farklı çözüm önerileri ile çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmanın ana problemi olan GSP'nin literatürde birçok farklı türü vardır. Bu problemlerden biri kümelenirilmiş GSP'dir (KGSP). KGSP'de, düğümlerin kümelere bölündüğü, tam ve yönlendirilmemiş serim bulunmaktadır ve amaç tüm düğümlerin ziyaret edilmesi ve her kümenin düğümlerinin ardışık olarak ziyaret edilmesi için en kısa Hamilton turunu bulmaktır. KGSP ilk olarak Chisman (1975) tarafından otomatize depolama problemi (automated warehousing problem) için önerilmiştir. Bu çalışmada problem tanımı verilmiş ve matematiksel modeli önerilmiştir. Bu problemin çeşitli pratik uygulamaları vardır. Örneğin, KGSP acil durum araç gönderme problemine (Weintraub vd. 1999), üretim planlama problemine (Lokin 1979), bilgisayar disk birleştirme, imalat, araç rotalama (Laporte ve Palekar 2002) ve marketler ile ticari işlemlerle ilgili problemlere uygulanmıştır (Ghaziri ve Osman 2003). KGSP, NP-zor sınıfındadır (Mestria 2018). López-Ibáñez vd. (2014) Tekrarlı Yerel Aramaya (Iterated Local Search-ILS) dayalı karma bir meta-sezgisel algoritma önermişlerdir. ILS'nin uygulandığı diğer çalışmalar, Juan vd. (2014) ve Mestria (2016) tarafından yapılmıştır. Yaklaşık, kesin, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar gibi çeşitli eniyileme yöntemleri de incelenmiştir (Anily vd. 1999, Arkin vd. 1997, Bao ve Liu 2012, Ding vd. 2007, Gendreau vd. 1994, Gendreau vd. 1997, Guttmann-Beck vd. 2000, Jongens ve Volgenant 1985, Laporte vd. 1997, Mestria vd. 2013, Potvin ve Guertin 1996).

Literatürde üzerinde durulan bir başka problem türü ise Kümelenirilmiş Oryantiring Problemidir (KOP). Bu problem ilk olarak Angelelli vd. (2014) tarafından önerilmiştir. KOP'da müşteriler kümeler halinde gruplandırılır ve her kümeyle bir kâr değeri ilişkilendirilir. Ancak kümedeki tüm müşterilere hizmet verilirse ilgili kâr değeri toplanır. Yahiaoui vd. (2017) KOP'u ele alarak önce sırala-sonra kümelenir yaklaşımına dayalı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Önerilen yaklaşım iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilkinde adaptif büyük komşu arama sezgiseli (Adaptive Large Neighborhood Search) kullanılmıştır. İkincisinde ise elde edilen büyük turun parçalanması prensibine dayanan dal-sınır algoritması tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Zhang vd. (2020), Kümelenirilmiş Kapsam (Clustered Coverage) OP (KKOP) olarak adlandırılan özel bir problem türü önermiştir ve bu KKGSP sınıfına ait genelleştirilmiş bir problemdir. KKOP, klasik OP'den iki yönüyle farklılaşır: birincisi, KKOP, ziyaret

edilen düğümlerle ilişkili kapsama alanlarının birleşiminden elde edilen toplam kâr enbüyükler. İkinci olarak, KKOP, düğüm kümeleriyle ilgilidir ve küme-bağımlı kısıtlamalar içermektedir. Archetti vd. (2018), Set Oryantiring Problemi (SOP) olarak adlandırılan başka bir OP türü önermiştir. SOP'da, her kümeyle bir kâr ilişkilendirilir ve kümede en az bir müşteri ziyaret edildiğinde küme ile ilişkili kâr elde edilir. Amaç, belirlenen süre içerisinde toplam kârın enbüyüklediği turun bulunmasıdır. SOP'u çözmek için Pěnička vd. (2019) tarafından Değişken Komşu Arama (Variable Neighborhood Search-VNS) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada SOP için yeni bir tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu önerilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre önerilen yaklaşımın daha iyi ve hızlı çözümler verdiği görülmüştür. SOP için meta-sezgisel algoritma önerilen bir diğer çalışma ise Carrabs (2021) tarafından yapılmıştır. Çalışmada SOP'u çözmek için üç yerel arama prosedürü uygulanarak eğilimli rassal anahtar genetik algoritma önerilmiştir. Çözüm sonuçlarının literatürde bulunan diğer algoritmalara göre hız açısından üstünlük sağladığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada, SGSP ailesinin bir genellemesi olan Seçici Kümelenirilmiş Gezgin Satıcı Problemi (SKGSP) ele alınmaktadır. Bu problemde, müşteriler gruplara ayrılarak kümelenirilmiş ve kümelerin hepsi ziyaret edilmek zorunda değildir. Bir küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir. Ancak ziyaret edilen bir kümede tüm müşterilere uğranması zorunludur. Her müşterinin belirli bir kazanç değeri vardır ve ziyaret edildiğinde elde edilir. Amaç, belirli bir zaman kısıtı içerisinde toplam kazancı enbüyüklemektir. Zaman sınırı nedeniyle, tüm kümeler turda ziyaret edilemez, ancak ziyaret edilen bir kümede tüm düğümler turda olmalıdır. SKGSP literatürde Angelelli vd. (2014) tarafından Kümelenirilmiş OP (KOP) olarak ele alınmıştır. Her kümede tek bir müşteri bulunması durumunda KOP, OP'ye dönüşür. Bu çalışmada SKGSP'nin karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) formülasyonları verilmiştir. SKGSP için farklı türde yardımcı değişkenler kullanarak üç farklı matematiksel formülasyon önerilmektedir. Bu formülasyonlar arasındaki temel fark, farklı yapılar alt tur engelleme kısıtları oluşturulurken kullanılan yardımcı değişkenlerin yorumlanması ile meydana gelmektedir. Matematiksel formülasyonlar, kullanılan yardımcı değişkenlerin tanımları nedeniyle düğüm tabanlı (NB) ve akış tabanlı (FB) olarak sınıflandırılır.

Yukarıda açıklanan problem türleri arasında KOP ve SOP, SKGSP'ye en çok benzeyen iki problemdir. SKGSP,

KOP'dan iki yönüyle farklılaşır. İlk olarak, KOP'da bir müşteri birden fazla kümeye ait olabilirken SKGSP'de kümelerin kesişiminde eleman bulunmamaktadır. İkincisi, SKGSP'de her küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir, ancak KOP'da bir küme tur boyunca bir kereden fazla ziyaret edilebilir. SOP ile SKGSP arasındaki farklılık ise şu şekilde açıklanabilir: SKGSP'de kazanç düğümleri ilişkilidir. Çözümde bir küme seçildiğinde, tüm düğümler ziyaret edilmelidir ve toplam kazanç, kümede ziyaret edilen düğümlerin kazançları toplamına eşittir. Bunun aksine, SOP'ta kâr kümeleri ilişkilidir ve kümeden en az bir müşteri ziyaret edildiğinde kümenin kârı toplanır. Birden fazla müşteri ziyaret etmek tur seyahat süresini artıracığından, çözümde en fazla bir müşteriyi ziyaret etmek daha kabul edilebilir olacaktır. Bu yönüyle, kümedeki tüm müşteriler ziyaret edilemediğinden SKGSP probleminden farklılık göstermektedir.

Bu çalışmadaki motivasyonumuz, pratik uygulamaların SKGSP'nin türevleri veya genellemeleri olarak analiz edilip formüle edilebilmesidir. Bu tür uygulamaların örnekleri, tüm müşterileri ziyaret etmek için yeterli zamanı olmayan GSP'de olduğu gibi kitle tipi ürünlerin dağıtımı ile ilgilidir. Problemden gezgin, her müşteriye yapılan satış miktarını bilmekte ve seyahati belirli bir zamanla sınırlı tutarken toplam satışları enbüyüklemek istemektedir (Tsiligirides 1984). Evlere yakıt dağıtım probleminde olduğu gibi, bir kamyon filosu günlük olarak çok sayıda müşteriye teslimat yapmak zorundadır. Müşterilerin yakıt stok seviyesi her zaman yeterli seviyede tutulmalıdır. Amaç, her gün ziyaret edilmesi gereken kümelenirilmiş müşterilerin bir alt kümesini etkin araç güzergahı elde edecek şekilde seçmektir (Golden vd. 1987). Başka bir uygulama, telekomünikasyon ağları oluştururken tek halkalı tasarım problemi (the single-ring design problem) dir (Thomadsen ve Stidsen 2003). Bunun yanında, bir bölgeyi ziyaret eden bir turist grubunun ilgilendikleri her bölgeyi ziyaret edemediği gezici turist rehberi veya turist gezisi tasarım problemi ise bir diğer uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır (Souffriau vd. 2008, Vansteenwegen ve Van Oudheusden 2007).

Problemin kümelenirilmiş türevinde (Angelelli vd. 2014), müşteriler farklı tedarik zincirlerine ait perakendecilerdir ve taşıma firmaları bu zincirler ile anlaşma yaptığında o zincire ait tüm perakendecilere hizmet vermek zorundadır. Başka bir örnek, ürünlerin markalara göre ayrıldığı durumdur. Taşıyıcı firma, kâr elde etmek için anlaşmalı olduğu markanın belirli bir miktar ürününe ihtiyaç duyan tüm perakendecilere hizmet vermek zorundadır. Ayrıca, müşterilerin bölgelerde kümelenmesi ve sadece bir bölgedeki tüm müşterilere hizmet verilmesi halinde kârın toplanması durumunda farklı bir durum

ortaya çıkmaktadır. Örneğin, atık toplama hizmetleri sunan şirketlerde belediyeler tarafından görevlendirilmesi durumunda karşımıza çıkar.

SKGSP'nin kitle ürünlerinin dağıtımı gibi birçok pratik uygulamada kullanılma olanağı bulunmaktadır. Hizmet sistemleri, turizm ve modern lojistikte planlama faaliyetlerinin tasarımı gibi alanlar bunlara örnek olarak verilebilir. Turist gezisi tasarımı ve kişiselleştirilmiş elektronik turist rehberlerinin planlanması, SKGSP'nin turizme nasıl uygulanabileceğine dair diğer örneklerdir. Servis sistemlerinde, satış temsilcisi planlama ve onarım/bakım gibi problemleri modellemek ve tasarlamak için de kullanılabilir.

Literatürdeki rotalama problemleri arasında, en iyi rotaların kümelenirme veya gruplandırma ile araştırıldığı tüm problemlerde maliyet/mesafe enküçükleme dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, birçok gerçek yaşam probleminin rotalama için yeterli kaynağı veya zamanı yoktur. Başka bir deyişle, tüm düğümleri veya kümeleri ziyaret etmek mümkün değildir. Bu nedenle, belirli bir kritere göre mevcut düğümler veya kümeler arasında seçim yapmak gerekir. Bu çalışmada ortaya konan problem, literatürdeki küme tabanlı rotalama problemlerinin aksine, kârın belirli bir zaman/bütçe kısıtlaması altında enbüyüklediği türde bir problemdir. Bu problemin gerçek yaşam uygulamalarına bir başka örnek ise, evde bakım hizmetleri, sipariş kabulü ve zamanlamasıdır. Bu tür problemlerde, ürün/hizmet ailesini ve işleri temsil etmek için düğümleri temsil eden kümeler göz önünde bulundurularak, belirli bir çalışma süresinde kârı enbüyükleyecek şekilde ürün ailelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde, yukarıda bahsettiğimiz gerçek yaşam problemlerini temsil eden uygun bir rotalama problem tanımı yoktur. Bu nedenle hem düğüm kümelerini dikkate alan hem de kârı enbüyüklemeyi hedefleyen yeni bir problem ortaya çıkarma ihtiyacı doğmuştur. SKGSP'yi ele alma motivasyonumuz, yukarıda açıklanan nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Mevcut literatür araştırması ışığında, bu çalışmanın ana katkıları:

- Literatürdeki küme tabanlı rotalama problemlerinin aksine, kazancın belirli bir zaman/bütçe kısıtlaması altında enbüyüklediği SKGSP önerilmiştir.
- Probleme ait üç yeni matematiksel formülasyon önerilmiştir.
- Matematiksel formülasyonlar, altı saatlik süre sınırı içerisinde düğüm sayısı 200 ve küme sayısı 41'e kadar olan örnek problemler için eniyi çözümü elde edebilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımları şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de SKGSP'nin matematiksel tanımı verilmektedir. Bölüm 3'te, SKGSP için önerilen MILP formülasyonları sunulmaktadır. Bölüm 4'te, MILP formülasyonları üzerinde gerçekleştirilen hesaplamalı deneyleri ve elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır. Bölüm 5'te genel değerlendirme ve gelecek çalışmalara yer verilmektedir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

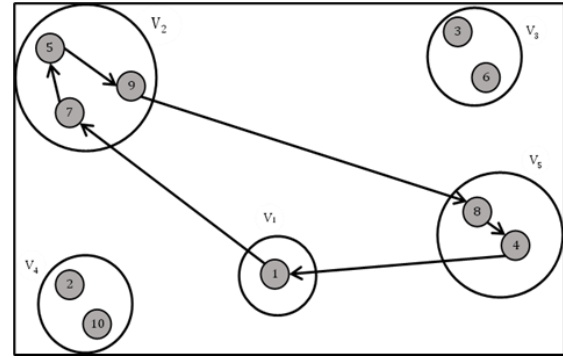
## 2. Problemin Tanımı

SKGSP yönlü bir  $G = (V, A)$  grafiği kullanılarak tanımlanabilir; burada  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  düğümler ve  $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$  ayrıtlar kümesidir. Düğümler kümesi,  $V = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k$  ve  $V_p \cap V_l = \emptyset, \forall p, l, p \neq l$  olacak şekilde kesişimleri boş küme olan  $k$  alt kümeye (salkım) ayrılır. Her  $j \in V \setminus V_1$  düğümü ile ilişkili bir  $s_j > 0$  kazanç değeri ve her bir  $(i, j) \in A$  ayrıtına karşı gelen bir  $t_{ij} > 0$  seyahat süresi vardır. Düğüm 1, başlangıç/bitiş noktası olarak işlev görür.  $V_1 = \{1\}$  kümesinin tek elemanıdır ve kazanç değeri yoktur. Belirli bir  $T_{max}$  zaman sınırında, tüm kümeler ziyaret edilemeyebilir. Bir küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir ve bir kümeye giriş yapıldığında küme içerisindeki bütün düğümlere uğranmalıdır. Bu problemde amaç, toplam kazancı enbüyükleyecek şekilde seçilen küme (ler) deki tüm düğümleri ziyaret eden bir turun belirlenmesidir. Şekil 1'de, yönlü bir serim üzerinde 10 düğüm ve 5 küme bulunan örnek bir SKGSP turu verilmektedir ve bu turda yalnızca 3 küme ziyaret edilmektedir.

## 3. SKGSP için Önerilen Matematiksel Formülasyonlar

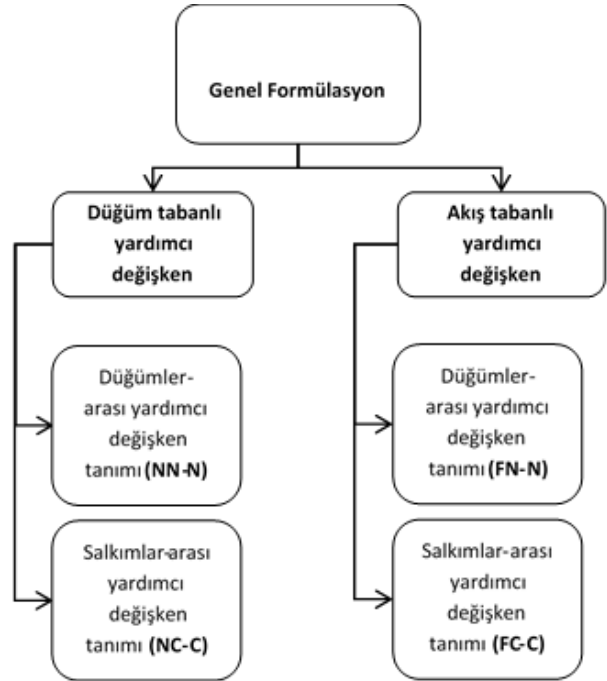
Çalışmanın bu bölümünde önce SKGSP için genel bir formülasyon verilmektedir, ardından farklı yardımcı değişken tanımlamaları ile ek kısıtların eklendiği üç yeni formülasyon önerilmiştir. Genel formülasyonda, düğümler bir turdaki sıralarına göre ziyaret edilir. Alt turları engelleyici ve sınırlayıcı kısıtların (süre, bütçe, maliyet limiti vb.) aşılmasını önlemek için yardımcı değişkenler tanımlanmıştır. Formülasyonlar yardımcı karar değişkenlerinin tanımına göre sınıflandırılmıştır. Bu değişkenler serimin düğümlerine göre ise NB (düğüm-tabanlı), ayrıtlarına göre ise FB (akış-tabanlı) olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu tanımlama düğümler arasında yapılmış ise yardımcı değişkenin Düğümden-Düğüme (N\_N) tanımına sahip olduğu kabul edilir ve benzer şekilde, kümeler arasında yapılmış ise Kümeden-Küme (C\_C) tanımına sahip olduğu kabul edilir. Örneğin, bir formülasyonda kullanılan bir NB yardımcı değişkeni, düğümler arasında veya kümeler arasında tanımlanabilir. Benzer şekilde, bir formülasyonda kullanılan bir FB

yardımcı değişkeni, düğümler arasında veya kümeler arasında tanımlanabilir. Şekil 2'de, bu çalışmada önerilen farklı formülasyonlar ve bunlara karşılık gelen kısaltmalar verilmektedir.



Şekil 1. Örnek bir SKGSP turu

Önerilen tüm formülasyonlarda  $O(n^2)$  sayıda 0-1 tamsayı karar değişkenleri ve kısıt bulunmaktadır. Formülasyonlardaki tüm kısıtlar ve amaç fonksiyonu doğrusaldır. Formülasyonlarda kullanılan parametreler ve tanım kümeleri ilerleyen bölümde verilmektedir.



Şekil 2. Matematiksel Formülasyon Hiyerarşisi

### 3.1. Genel Formülasyon

Bu bölümde, çalışmada önerilen formülasyonlara ilişkin genel tanımlamalar ve kısıtlar verilmiştir.

*Simgeler:*

$n$ : düğüm sayısı.

$i, j$ : düğüm indisleri  $i, j = 1, 2, \dots, n$ .

$k$ : salkım sayısı.

$p, l$ : salkım indisleri  $p, l = 1, 2, \dots, k$ .

**Kümeler:**

$V = \{1, 2, \dots, n\}$ : düğümler kümesi.

$V_1$  : depoyu içeren başlangıç salkımı.

$A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$  : ayrıtlar kümesi.

$V_p$  :  $p$ . salkımda yer alan düğümler kümesi.

$V$  kümesi, kesişimleri boş küme ve eleman sayısı sıfırdan farklı olan ve her biri bir düğüm kümesini temsil eden  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_k$ , alt kümelerinden oluşmaktadır.

**Parametreler:**

$s_j$  :  $j$  düğümünden elde edilen kazanç (skor, getiri, kâr vb.) değeri.

$t_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki seyahat süresi.

$T_{max}$  : izin verilen en büyük seyahat süresi.

$n_p$  :  $p$ . salkımın eleman sayısı.

**Karar değişkenleri:**

$x_{ij}$  :  $i$ . düğümünden  $j$ . düğüme geçiş varsa 1, diğer durumlarda 0

Yukarıda verilen tanımlamalarla, SKGSP için genel formülasyon aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$\text{Enb } x_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n s_j x_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar altında

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} \leq 1, \quad p = 2, \dots, k \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V \setminus V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} \leq 1, \quad p = 2, \dots, k \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} = \sum_{i \in V_p} \sum_{j \notin V_p} (n_p - 1) x_{ji}, \quad n_p \geq 2, \quad p = 2, \dots, k \quad (8)$$

$$\sum_{i \notin V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} - \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ji} = 0, \quad p = 2, \dots, k \quad (9)$$

$$\sum_{j \notin V_p} x_{ij} + \sum_{j \in V_p} x_{ji} \leq 1, \quad \forall i \in V_p, \quad n_p \geq 2, \quad p = 2, \dots, k \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n t_{ij} x_{ij} \leq T_{max} \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \neq j, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

ve

**Alt tur engelleme + sınırlayıcı kısıtlar**

Amaç fonksiyonu (1) toplam kazancın enbüyüklenmesidir.

Kısıt (2) turun 1. düğümden başlamasını sağlayan kısıttır.

Kısıt (3) turun 1. düğümden bitmesini sağlayan kısıttır. Kısıt

(4) ve (5) her düğümün en fazla bir kez ziyaret edilmesini

sağlayan kısıtlardır. Kısıt (6) ve (7) her salkımın en fazla bir

kez ziyaret edilmesini sağlayan kısıtlardır. Kısıt (8), (9) ve

(10) birlikte (düğüm sayısı 2 ve daha fazla olan salkımlar

için) salkım içi turda sürekliliği sağlayan kısıtlardır. Bu üçlü

kısıt grubu formülasyonun sıkılaşması ve daha hızlı çözüm alabilmek amacıyla geliştirilerek eklenmiştir. Ayrıca GSP'nin literatürde yer alan genelleştirilmiş türevlerinin çözümü için önerilen matematiksel formülasyonlarda bu kısıtlar bulunmamaktadır. Bu kısıtlar olmadan da genel formülasyon kullanılabilir. Kısıt (11), toplam seyahat süresinin  $T_{max}$  zaman sınırını aşmamasını sağlar. Kısıt (12) karar değişkeni için işaret kısıtıdır.

SKGSP'nin formülasyonları, alt tur engelleme ve sınırlayıcı kısıtlar açısından birbirinden farklı olacaktır.

### 3.2. Çalışmada Önerilen Matematiksel Formülasyonlar /

Çalışmanın bu kısmında, yeni yardımcı değişkenler tanımlanarak SKGSP için 4 farklı (NN-N, NC-C, FN-N ve FC-C) formülasyon önerilmektedir. Bu modellerden FN-N isimli formülasyon Derya ve ark. (2023) çalışmasında önerilen matematiksel modeldir. Bölüm 3.1'de karar değişkenlerine ek olarak tanımlanan yardımcı değişkenler ile bu 4 formülasyon aşağıda verilmektedir.

**Düğüm Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon**

**NN-N Formülasyon: Düğüm tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin düğümler arasında tanımlanması.**

$u_i$  : Başlangıç noktasından (depodan) sonra  $i$ . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

$v_i$  :  $i$ . düğümün yer aldığı salkım içerisinde  $i$ . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin NN-N formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$u_i - u_j + n x_{ij} + (n - 2) x_{ji} \leq n - 1, \quad i \neq j, \quad i = 2, \dots, n, \quad j = 2, \dots, n \quad (13)$$

$$u_i \geq x_{i1} + 2 \sum_{\substack{j=2 \\ i \neq j}}^n x_{ji}, \quad i = 2, \dots, n \quad (14)$$

$$u_i \leq (n - 1) x_{i1} + (n - 2) \sum_{\substack{j=2 \\ i \neq j}}^n x_{ij} - (n - 3) x_{1i}, \quad i = 2, \dots, n \quad (15)$$

$$v_i - v_j + n_p x_{ij} + (n_p - 2) x_{ji} \leq (n_p - 1), \quad i \neq j, \quad \forall i, j \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (16)$$

$$v_i \geq \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n x_{ji} + \sum_{\substack{l \in V_p \\ l \neq i}} \sum_{j \in V_p} x_{jl}, \quad \forall i \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (17)$$

$$v_i \leq n_p \sum_{j \in V_p} x_{ij} + (n_p - 1) \sum_{j \in V_p} x_{ij}, \quad \forall i \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (18)$$

$$u_i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \quad (19)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \quad (20)$$

NN-N formülasyonunda Kısıt (13) turda düğümler arasında alt-turların oluşmasını engellerken, Kısıt (16) salkım içinde alt-turların oluşmasını engellemektedir. Kısıt (14) ve (15)  $u_i$  için, Kısıt (17) ve (18) ise  $v_i$  için alt ve üst sınırları belirlemektedir. Kısıt (19) ve (20) ise yardımcı karar değişkenleri için işaret kısıtlamalarıdır.

Salkım Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

*NC-C Formülasyon: Düğüm tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin salkımlar arasında tanımlanması.*

$u_p$  : Başlangıç salkımından (depodan) sonra  $p$ . salkıma uğrama (ziyaret etme) sırası

$v_i$  :  $i$ . düğümün yer aldığı salkım içerisinde  $i$ . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin NC-C formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)–(12)

ve

$$u_p - u_l + k \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ij} + (k - 2) \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ji} \leq k - 1, p \neq l, p, l = 2, \dots, k \quad (21)$$

$$u_p \geq \sum_{j \in V_p} x_{1j} + 2 \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V(V_p \cup V_1)} x_{ji}, p = 2, \dots, k \quad (22)$$

$$u_p \leq (k - 1) \sum_{i \in V_p} x_{i1} + (k - 2) \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V(V_p \cup V_1)} x_{ij} - (k - 3) \sum_{j \in V_p} x_{1j}, p = 2, \dots, k \quad (23)$$

$$v_i - v_j + n_p x_{ij} + (n_p - 2) x_{ji} \leq (n_p - 1), i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (24)$$

$$v_i \geq \sum_{j=1}^n x_{ji} + \sum_{l \in V_p} \sum_{j \notin V_p} x_{jl}, \forall i \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (25)$$

$$v_i \leq n_p \sum_{j \notin V_p} x_{ij} + (n_p - 1) \sum_{j \in V_p} x_{ij}, \forall i \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (26)$$

$$u_p \geq 0, p = 2, \dots, k \quad (27)$$

$$v_i \geq 0, i = 2, \dots, n \quad (28)$$

NC-C formülasyonunda Kısıt (21) turda düğümler arasında alt-turların oluşmasını engellerken, Kısıt (24) salkım içinde alt-turların oluşmasını engellemektedir. Kısıt (22) ve (23)  $u_i$  için, Kısıt (25) ve (26) ise  $v_i$  için alt ve üst sınırları belirlemektedir. Kısıt (27) ve (28) ise yardımcı karar değişkenleri için işaret kısıtlamalarıdır.

Düğümler Arası Ayrıt Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

*FN-N Formülasyon: Akış tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin düğümler arasında tanımlanması.*

$f_{ij}$  :  $i$ . düğümünden  $j$ . düğüme geçiş olması durumunda,  $(i, j)$  ayrıtının depodan itibaren sırası

$g_{ij}$  :  $i$ . ve  $j$ . düğümlerinin yer aldığı salkım içerisinde,  $(i, j)$  ayrıtının salkım içindeki sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin FN-N formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$f_{1j} = x_{1j}, j = 2, \dots, n \quad (29)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V \setminus V_p} f_{ij} - \sum_{j \in V \setminus V_p} \sum_{i \in V_p} f_{ji} = \sum_{j \in V \setminus V_p} \sum_{i \in V_p} x_{ji}, p = 2, \dots, k \quad (30)$$

$$f_{ij} \leq k x_{ij}, \forall i \in V_p, \forall j \in V \setminus V_p, p = 1, \dots, k \quad (31)$$

$$\sum_{j \in V_p} g_{ij} - \sum_{j \in V_p} g_{ji} + n_p \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad (32)$$

$$\forall i \in V_p, n_p \geq 2, p = 2, \dots, k \quad (32)$$

$$g_{ij} \leq (n_p - 1) x_{ij}, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (33)$$

$$f_{ij} \geq 0, \forall i \in V_p, \forall j \in V \setminus V_p, p = 1, \dots, k \quad (34)$$

$$g_{ij} \geq 0, i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (35)$$

FN-N formülasyonunda Kısıt (29) turdaki ilk ayrıtın 1. düğümünden başlamasını sağlamaktadır. Kısıt (30), alt turları engelleyen ve ayrıt sırasının kümülatif olarak artmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (31)  $f_{ij}$  için üst sınır belirleyen kısıttır. Kısıt (31) sayesinde, eğer  $(i, j)$  ayrıtı turda yer almıyorsa, karşı gelen değişken değerinin sıfır ( $f_{ij}=0$ ) olacağını garanti eden sınırlayıcı kısıttır. Kısıt (32) ve (33) salkım içerisinde alt tur engelleme ve  $g_{ij}$  için üst sınır kısıtlarıdır. Kısıt (34) ve (35) yardımcı değişkenler için işaret kısıtlamalarıdır (Derya ve ark., 2023).

Salkımlar Arası Ayrıt Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

*FC-C Formülasyon: Akış tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin salkımlar arasında tanımlanması.*

$f_{pl}$  :  $p$ . salkımdan  $l$ . salkıma geçiş olması durumunda,  $p$  ve  $l$  salkımlarını bağlayan ayrıtın depodan itibaren sırası

$g_{ij}$  :  $i$ . ve  $j$ . düğümlerinin yer aldığı salkım içerisinde,  $(i, j)$  ayrıtının salkım içindeki sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin FC-C formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$f_{1p} = \sum_{j \in V_p} x_{1j}, p = 2, \dots, k \quad (36)$$

$$\sum_{p=1}^k f_{pl} - \sum_{l=1}^k f_{lp} = \sum_{i \in V \setminus V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij}, p = 2, \dots, k \quad (37)$$

$$f_{pl} \leq k \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ij}, p \neq l, p = 1, \dots, k, l = 1, \dots, k \quad (38)$$

$$\sum_{j \in V_p} g_{ij} - \sum_{j \in V_p} g_{ji} + n_p \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad (39)$$

$$\forall i \in V_p, n_p \geq 2, p = 2, \dots, k \quad (39)$$

$$g_{ij} \leq (n_p - 1) x_{ij}, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (40)$$

$$f_{pl} \geq 0, p \neq l, p = 1, \dots, k, l = 1, \dots, k \quad (41)$$

$$g_{ij} \geq 0, i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (42)$$

FC-C formülasyonunda Kısıt (36) turdaki ilk ayrıtın 1. düğümünden başlamasını sağlamaktadır. Kısıt (37), alt turları engelleyen ve ayrıt sırasının kümülatif olarak artmasını

sağlayan kısıttır. Kısıt (38)  $f_{pl}$  için üst sınır belirleyen kısıttır. Kısıt (38) sayesinde, eğer  $(i, j)$  ayrıtı turda yer almıyorsa, karşı gelen değişken değerinin sıfır ( $f_{pl}=0$ ) olacağını garanti eden sınırlayıcı kısıttır. Kısıt (39) ve (40) salkım içerisinde alt tur engelleme ve  $g_{ij}$  için üst sınır kısıtlarıdır. Kısıt (41) ve (42) yardımcı değişkenler için işaret kısıtlamalarıdır.

Tüm düğüm tabanlı (NB) formülasyonlarda (NN-N ve NC-C) Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) (Miller vd. 1960) ile ilgili alt-tur engelleme kısıt yapısı kullanılmıştır. Akış tabanlı (FB) formülasyonlarda ise (FN-N ve FC-C) Gavish-Graves (GG) (Gavish ve Graves 1978) ile ilgili alt-tur engelleme kısıtları kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada SKGSP için geliştirilen matematiksel formülasyonlarda yer alan alt tur engelleme ve sınırlayıcı kısıtlar hem probleme özgü uyarlanmıştır hem de formülasyonları sıkılaştırmak amacıyla bu probleme özel olarak önerilmiştir.

Her formülasyon için  $n$  (düğüm sayısı) ve  $k$  (küme sayısı)'nin birer fonksiyonu olarak sürekli/ikili değişkenlerin ve kısıtları sayısı Büyük-O (Big-O) gösterimi ile Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Formülasyonların Boyutu

Formülasyon	Sürekli	İkili	Kısıt Sayısı
	Değişken Sayısı	Değişken Sayısı	
FC-C	$O(k^2)$	$O(n^2)$	$O(k^2)$
NC-C	$O(k)$	$O(n^2)$	$O(k^2)$
FN-N	$O(n^2)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$
NN-N	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$

#### 4. Deneysel Çalışmalar / Experimental Studies

Bu bölümde deneysel çalışmalara ait sonuçlar verilmektedir. Matematiksel formülasyonlar varsayılan parametrelerle CPLEX çözücüsü (versiyon 21.10) ile çözülmüştür. Deneysel çalışmalar için Intel Core i7-9700 3.00 GHz işlemci ve 8 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayar kullanılmıştır. Her problemin çözümü için işlemcinin sekiz çekirdeği birlikte paralel olarak kullanılmıştır.

Aşağıdaki alt bölümlerde SKGSP için test problemlerinin nasıl oluşturulduğu açıklanmakta ve elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

##### 4.1. Test Problemleri

Bu çalışmada Fischetti, Salazar González ve Toth (1997) tarafından önerilen Genelleştirilmiş GSP (GGSP) veri seti kullanılmıştır ve Archetti ve dię. (2018)'de açıklandığı şekliyle oluşturulmuştur. GGSP veri setini tek depolu SKGSP ile değiştirmek için, her veri setindeki ilk düğüm, orijinal GGSP kümesinden kaldırılmış ve onun yerine yeni bir depo kümesi ( $V_1$ ) eklenmiştir. Her problem için

seyahat süresi sınırı  $Tmax$ , GGSP problemlerinde KGSP çözümlere hesaplanmıştır. Bu  $Tmax$ ,  $\omega =1$ 'e karşılık gelmektedir.  $\omega$  oranları farklı  $Tmax$  değerleri elde etmek için 0 ile 1 aralığında değiştirilmiştir. Veri setlerinde, her düğüm için iki farklı kazanç ( $p_1, p_2$ ) dikkate alınmıştır.  $p_1$ 'de her  $j$  düğümünün birim kazanç değeri 1'dir.  $p_2$ 'de ise, her  $j$  düğümünün kazancı,  $1+(7141j) \bmod(100)$  formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Veri seti 14 ile 400 düğüm arasında değişen farklı boyutlarda 52 problemden oluşmaktadır. Her problem için iki farklı kazanç değeri ( $p_1, p_2$ ) ve dört farklı  $\omega$  değeri (0.4, 0.6, 0.8, 1.0) kullanılarak toplamda 416 adet test problemi elde edilmiştir.

##### 4.2. Karşılaştırmalı Sonuçlar

Bu çalışmada dört farklı formülasyonun karşılaştırması farklı performans kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Bu dört formülasyondan FN-N modeli Derya ve ark. (2023)'nin çalışmasında yer alan formülasyondur. Matematiksel formülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasında dört performans kriteri dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki ortalama eniyi üst sınır değeridir. Eniyi üst sınır değeri, matematiksel formülasyonun doğrusal gevşetilmiş çözümünden elde edilen amaç fonksiyonu değeridir. Enbüyükleme problemlerinde bu değerin küçük olması formülasyonun sıkı olduğunu göstermektedir. Her problem için bu değerler elde edilmiş ve ortalaması alınarak her formülasyon için bu performans kriter değeri belirlenmiştir. İkincisi, ortalama çözüm süresidir. Her problemin çözüm süresinin ortalaması alınarak her formülasyon için bu performans kriteri hesaplanmıştır. Üçüncü kriter toplam eniyi çözüm sayıdır. Bu kriterden elde edilen değerler, her bir formülasyon ile 416 problem içinden eniyi çözüme ulaşılanların toplam sayıdır. Son kriter olan ortalama eniyi tamsayılı çözüm değeri ise, 6 saat (21600 sn.) süre sınırı içerisinde her formülasyon ile elde edilen eniyi tamsayılı çözümlerin amaç fonksiyonu değerlerinin ortalamasını vermektedir. Enbüyükleme problemlerinde bu değerin büyük olması formülasyonun performansının iyi olduğunu göstermektedir. Bu performans kriterlerine ilişkin sonuçlar Şekil 3'te verilmektedir. Şekil 3, incelendiğinde FC-C formülasyonunun tüm performans kriterlerinde diğer formülasyonlara göre üstün olduğunu göstermektedir. Tüm performans kriterlerinde bu formülasyonu, NC-C izlemektedir. Ayrıca, yardımcı değişkenin salkımlar arası tanımlandığı formülasyonların diğerlerine göre üstünlük sağladığı görülmektedir. Literatürde yer alan Derya ve ark. (2023)'nin çalışmasında önerilen model ile karşılaştırma yapıldığında; FN-N formülasyonu, ortalama eniyi üst sınır değeri kriterine, ortalama çözüm süresi kriterine ve toplam eniyi çözüm

sayısı kriterine göre 3. sırada, ortalama eniyi tamsayılı çözüm kriterine göre ise sonuncu sırada yer almıştır. Bu dört formülasyondan eniyi performans gösteren model bu çalışmada önerilen FC-C olmuştur.

Şekil 4 ve Şekil 5'te farklı  $\omega$  değerlerinde göre çözüm sürelerinin ve eniyi çözüme ulaşılan problem sayılarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekillerde T40, T60, T80 ve T100 ile sırasıyla  $\omega=0.4$ ,  $\omega=0.6$ ,  $\omega=0.8$  ve  $\omega=1.0$  olduğu ifade edilmektedir. Çözüm süresi açısından bakıldığında  $T_{max}$  değeri arttıkça çözüm süresinin tüm formülasyonlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: Ele alınan problem yapısında, salkımların seçimi ve sıralanması şeklinde iki karar bulunmaktadır.  $T_{max}$  süresi arttıkça salkımların seçimi için seçenek sayısı azalmakta ve  $\omega=1.0$  olduğunda bu durum tamamen ortadan kalkmaktadır. Benzer şekilde, eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı açısından bakıldığında  $T_{max}$  değeri arttıkça bu değer arttığı yani daha fazla sayıda eniyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4 ve 5 incelendiğinde hem çözüm süresinde hem de eniyi çözüme ulaşılan problem sayısında farklı  $\omega$  değerlerine göre FC-C modeli, Derya ve ark. (2023)'ün çalışmasında önerilen FN-N modeline göre üstünlük göstermiştir.

Çizelge 2'de ise formülasyonların farklı  $\omega$  değerlerine göre ortalama %GAP değerleri verilmiştir. Buradaki %GAP değeri,  $\%GAP = (UST-\#)/\#*100$  formülü ile hesaplanmıştır. Bu değer küçük olması ilgili formülasyonun daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Formülde yer alan UST, 21600 sn. süre sınırı içerisinde elde edilen eniyi doğrusal gevşetilmiş çözüm değerini ve # ise bulunan eniyi tamsayılı çözüm değerini göstermektedir. Çizelge 2'deki sonuçlara göre  $\omega$  değeri arttıkça tüm formülasyonlarda ortalama %GAP değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca formülasyonlar arasında FC-C modelinin en küçük ortalama %GAP değerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Derya ve ark. (2023)'ün çalışmasında önerilen FN-N ise genel ortalamaya göre üçüncü sırada yer almıştır. Bu sonuçlar yukarıda verilen sonuçları destekleyici niteliktedir.

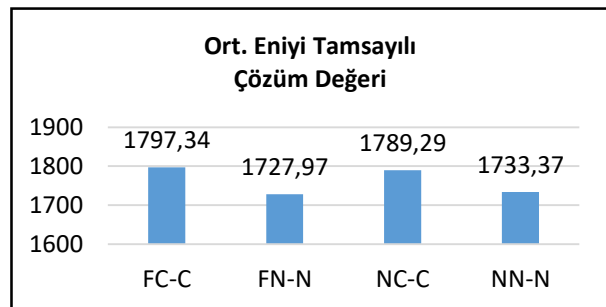
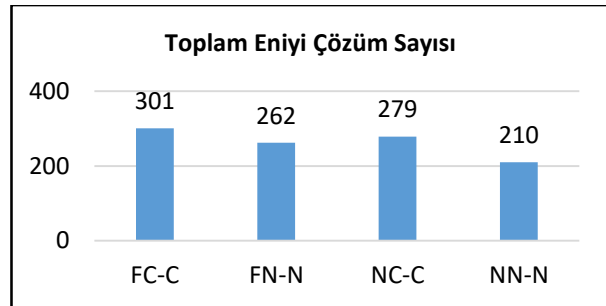
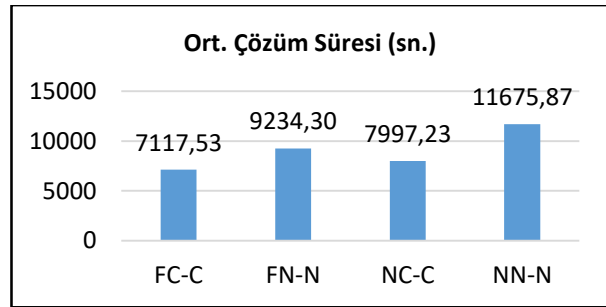
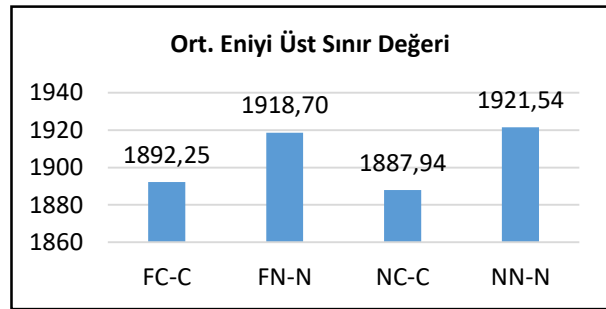
**Çizelge 2.** Tüm Formülasyon ve Farklı  $\omega$  Değerlerine Göre Ortalama %GAP Değerleri

	T40	T60	T80	T100	Genel Ort.
FC-C	8,79	4,94	1,85	0,40	4,00
FN-N	16,95	11,81	4,54	1,17	8,62
NC-C	7,94	5,44	3,08	0,89	4,33
NN-N	17,17	10,46	6,22	2,06	8,98
<b>Genel Ort.</b>	<b>12,71</b>	<b>8,16</b>	<b>3,92</b>	<b>1,13</b>	<b>6,48</b>

Son olarak  $\omega=1.0$  için, tüm her bir test probleminin her bir formülasyon ile çözümünden elde edilen, eniyi tamsayılı

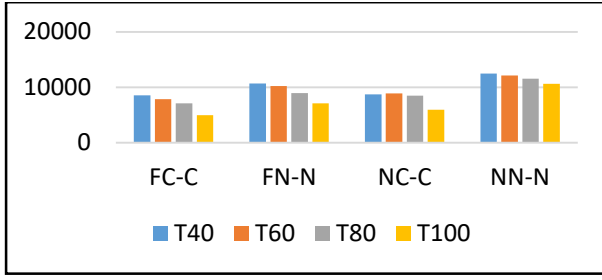
çözümün amaç fonksiyonu değeri ve %GAP değeri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3'te bulunan bilgiler ayrıca formülasyonun doğruluğunun ispatlanmasında destekleyici niteliktedir. Şöyle ki; SKGSP'deki T<sub>max</sub> süre sınırına problemde yer alan tüm salkım ve düğümlere uğrayacak şekilde yeterince büyük bir değer verildiğinde ( $\omega=1.0$  olduğunda) KGSP'ye dönüşmektedir. KGSP'nin eniyi çözümünde tüm salkım ve salkım içerisindeki tüm düğümlerin ziyaret edilme zorunluluğu bulunmaktadır.

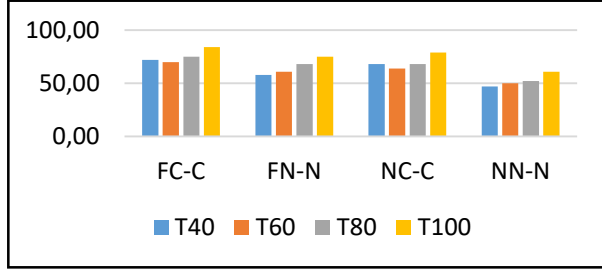


**Şekil 3.** Performans Ölçütlerine Göre Formülasyonların Karşılaştırılması (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)





Şekil 4. Farklı  $\omega$  Değerlerine Göre Çözüm Sürelerinin Karşılaştırılması



Şekil 5. Farklı  $\omega$  Değerlerine Göre Eniyi Çözüm Sayılarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada ele alınan problemin KGSP'den farkı, deponun ayrı bir başlangıç salkımı içerisinde yer almasıdır. Dolayısıyla  $\omega=1.0$  olduğunda elde edilen çözümlerde n-1 düğümün ziyaret edilmesi gerekmektedir. Çizelge 3'te ayrıntılı olarak verilen sonuçların tümü  $\omega=1.0$  için alınan çözümlerdir. %GAP değerinin sıfır olduğu çözümler incelendiğinde  $p1$  amaç fonksiyonu yapısına sahip problemlerde amaç fonksiyonu değerinin düğüm sayısından 1 eksik olduğu görülmektedir. Bu da modellerin doğru sonuçlar verdiğini desteklemektedir. Çizelge 4-6'da ise sırasıyla  $\omega=0.8$ ,  $\omega=0.6$  ve  $\omega=0.4$  için bulunan sonuçların tümü ve %GAP değerleri verilmiştir.

Çizelge 7'de 10att48 ve 16eil76 problemlerinin çözümleri verilmiştir. Bu çözümler farklı  $\omega$  değerlerine ve farklı amaç fonksiyonu yapılarına (P1/P2) göre gösterilmiştir. İlk sütunda problemin adı, ikinci sütunda problemdeki düğüm sayısı, üçüncü sütunda problemdeki salkım sayısı, dördüncü sütunda  $\omega$  değerleri, beşinci sütunda amaç fonksiyonu yapısı, altıncı sütunda ise problemde verilen  $T_{max}$  sınırı bilgileri yer almaktadır. İzleyen sütunlarda ise problemin çözümü sonucunda elde edilen bilgiler yer almaktadır. Yedinci ve sekizinci sütunda sırasıyla problemin eniyi amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresi, dokuzuncu sütunda turda uğranılan salkım sayısı, onuncu sütunda tur süresi ve son sütunda ise tur boyunca uğranılan düğümlerin listesi yer almaktadır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada ele alınan dört formülasyon içerisinde akış tabanlı (FB) modeller düğüm tabanlı modellere (NB) göre üstünlük sağlamıştır. Bunun yanında yardımcı değişkenlerin salkımlar arası

tanımlandığı modeller, düğümler arası tanımlanan modellere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu dört formülasyon içerisinde akış tabanlı ve yardımcı değişkenin salkımlar arası tanımlandığı model olan FC-C formülasyonu diğerlerine göre üstünlük sağlamıştır.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada SKGSP problemi için üç yeni formülasyon önerisi yapılmıştır. Problemden bir seyahat süresi sınırı bulunmaktadır ve her müşterinin bir kazanç değeri vardır. Amaç, müşterilerden toplanan toplam kazancı enbüyüklemektir. Formülasyonların sonuçlarına göre tüm örneklerin %72'si FC-C ile %67'si NC-C ile %63'ü FN-N ile ve %51'i NN-N ile en iyi çözüme ulaşılmıştır. Bu oranlara göre tüm formülasyonların örneklerin yarısından fazlasında en iyi çözüme ulaşılmıştır. Ayrıca tüm formülasyonlar eniyi çözüme ortalama %6 yaklaşık çözüm bulabilmiştir. Matematiksel formülasyonlar ile 200 düğüm 41 salkımla problemlerin eniyi çözümü elde edilmiştir. Bunun yanında FC-C modeli literatürde yer alan FN-N modeline göre tüm performans kriterlerinde üstünlük sağlamıştır. Gerçek hayat problemlerinin çözümünde sezgisel teknikler kullanılarak yaklaşık sonuçlar yerine kesin çözüm elde edebildiğimiz matematiksel formülasyonları kullanmanın önemi büyüktür. Yukarıda belirttiğimiz bu oranlar bu çalışmada önerilen matematiksel formülasyonların etkili olduğunu göstermektedir.

SKGSP'nin kitlesel ürünlerin dağıtımından turizme ve modern lojistiğe kadar çeşitli alanlarda olası pratik uygulamaları bulunmaktadır. Dolayısıyla bu probleme yönelik önerilen formülasyonlar hem dağıtım sektörüne hem de müşterilere fayda sağlayacak (firmaların maliyetlerinin ve müşterilerin hizmet satın alma maliyetlerinin azalması) niteliktedir.

Bu konuyla ilgili gelecekteki çalışmalarda, ek kısıtlamalar ve sınırlamalarla diğer gerçekçi SKGSP varyantları ele alınabilir. Bunlara örnek olarak Zaman Pencereli SKGSP, çok depolu (multi-depot), heterojen ve kapasiteli çok turlu (multi-trip) SKGSP verilebilir. Bu varyantlar ile problem, turizm ve modern lojistik alanlarında karşılaşılabilecek farklı gerçek hayat problemlerine kolaylıkla uyarlanabilir. Ayrıca SKGSP'yi çözmek için matematiksel formülasyonların yanında meta-sezgisel yaklaşımlar geliştirilebilir.

**Çizelge 3.**  $\omega = 1.0$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
10att48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20kroD100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	97	2,06
10att48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20kroD100_P2	5008	0,00	4962	0,93	5008	0,00	4962	0,93
10gr48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20kroE100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	98	1,02
10gr48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20kroE100_P2	5008	0,00	4938	1,42	5008	0,00	4887	2,48
10hk48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20rat99_P1	98	0,00	98	0,00	98	0,00	98	0,00
10hk48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20rat99_P2	5007	0,00	5007	0,00	5007	0,00	5007	0,00
11berlin52_P1	51	0,00	51	0,00	51	0,00	51	0,00	20rd100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00
11berlin52_P2	2608	0,00	2608	0,00	2608	0,00	2608	0,00	20rd100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00
11eil51_P1	50	0,00	50	0,00	50	0,00	50	0,00	21eil101_P1	100	0,00	100	0,00	100	0,00	100	0,00
11eil51_P2	2575	0,00	2575	0,00	2575	0,00	2575	0,00	21eil101_P2	5050	0,00	5050	0,00	5050	0,00	5050	0,00
12brazil58_P1	57	0,00	57	0,00	57	0,00	57	0,00	21lin105_P1	104	0,00	104	0,00	104	0,00	104	0,00
12brazil58_P2	2967	0,00	2967	0,00	2967	0,00	2967	0,00	21lin105_P2	5228	0,00	5228	0,00	5228	0,00	5157	1,38
14st70_P1	69	0,00	69	0,00	69	0,00	69	0,00	22pr107_P1	104	1,92	101	4,95	101	4,95	101	4,95
14st70_P2	3513	0,00	3513	0,00	3513	0,00	3513	0,00	22pr107_P2	5268	1,80	5102	5,12	5101	5,14	4826	11,13
16eil76_P1	75	0,00	75	0,00	75	0,00	75	0,00	24gr120_P1	119	0,00	119	0,00	119	0,00	118	0,85
16eil76_P2	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	24gr120_P2	6038	0,00	6038	0,00	6038	0,00	6006	0,53
16pr76_P1	75	0,00	75	0,00	75	0,00	75	0,00	25pr124_P1	121	1,65	121	1,65	123	0,00	114	7,89
16pr76_P2	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	25pr124_P2	6232	0,00	6050	3,01	6173	0,96	6050	3,01
20gr96_P1	95	0,00	95	0,00	95	0,00	95	0,00	26bier127_P1	126	0,00	126	0,00	125	0,80	125	0,80
20gr96_P2	4850	0,00	4850	0,00	4850	0,00	4850	0,00	26bier127_P2	6333	0,00	6333	0,00	6333	0,00	6314	0,30
20kroA100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00	26ch130_P1	129	0,00	129	0,00	129	0,00	129	0,00
20kroA100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	26ch130_P2	6503	0,00	6503	0,00	6503	0,00	6418	1,32
20kroB100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	96	3,13	28gr137_P1	136	0,00	136	0,00	135	0,74	133	2,26
20kroB100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	4937	1,44	28gr137_P2	6868	0,00	6795	1,07	6795	1,07	6700	2,51
20kroC100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00	28pr136_P1	134	0,75	135	0,00	134	0,75	129	4,65
20kroC100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	28pr136_P2	6841	0,13	6841	0,13	6841	0,13	6781	1,02

Çizelge 3 (devam).  $\omega=1.0$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
29pr144_P1	141	1,42	141	1,42	141	1,42	120	19,17	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	
29pr144_P2	7137	1,47	7137	1,47	7137	1,47	6255	15,78	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	
30ch150_P1	149	0,00	149	0,00	149	0,00	149	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	
30ch150_P2	7533	0,00	7427	1,43	7533	0,00	7450	1,11	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	
30kroA150_P1	149	0,00	147	1,36	149	0,00	147	1,36	4ulysses16_P1	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00
30kroA150_P2	7487	0,61	7487	0,61	7533	0,00	7471	0,83	4ulysses16_P2	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00
30kroB150_P1	149	0,00	148	0,68	148	0,68	143	4,20	5gr21_P1	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
30kroB150_P2	7533	0,00	7445	1,18	7503	0,40	7280	3,48	5gr21_P2	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00
31pr152_P1	147	2,72	137	10,22	145	4,14	136	11,03	5gr24_P1	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00
31pr152_P2	7611	0,62	7486	2,30	5800	32,03	5800	32,03	5gr24_P2	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00
32u159_P1	157	0,64	157	0,64	157	0,64	146	8,22	5ulysses22_P1	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00
32u159_P2	8011	0,32	8011	0,32	8011	0,32	7803	3,00	5ulysses22_P2	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00
35si175_P1	174	0,00	173	0,58	173	0,58	172	1,16	6bayg29_P1	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00
35si175_P2	8809	0,27	8796	0,42	8744	1,02	8660	2,00	6bayg29_P2	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00
36brg180_P1	178	0,56	178	0,56	178	0,56	178	0,56	6bays29_P1	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00
36brg180_P2	8514	7,21	9035	1,03	9035	1,03	9035	1,03	6bays29_P2	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00
39rat195_P1	194	0,00	194	0,00	194	0,00	194	0,00	6fri26_P1	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00
39rat195_P2	9863	0,00	9863	0,00	9863	0,00	9863	0,00	6fri26_P2	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00
3burma14_P1	13	0,00	13	0,00	13	0,00	13	0,00	7ftv33_P1	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00
3burma14_P2	677	0,00	677	0,00	677	0,00	677	0,00	7ftv33_P2	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00
40d198_P1	195	1,03	171	15,20	171	15,20	166	18,67	8ftv36_P1	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00
40d198_P2	8628	15,87	8677	15,21	8628	15,87	8628	15,87	8ftv36_P2	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00
40kroa200_P1	198	0,51	198	0,51	198	0,51	190	4,74	8ftv38_P1	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00
40kroa200_P2	9970	0,88	8386	19,94	9922	1,37	9552	5,30	8ftv38_P2	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00
40kroB200_P1	199	0,00	196	1,53	199	0,00	196	1,53	9dantzig42_P1	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00
40kroB200_P2	9953	1,05	7922	26,96	10021	0,37	10021	0,37	9dantzig42_P2	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00

**Çizelge 4.**  $\omega=0.8$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	20kroD100_P1	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.00	81.00	0.05	
10att48_P2	2029.00	0.00	2029.00	0.00	2029.00	0.00	2029.00	0.00	20kroD100_P2	4185.00	0.01	4087.00	0.10	4185.00	0.00	4185.00	0.00	4063.00	0.10	
10gr48_P1	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	20kroE100_P1	85.00	0.00	85.00	0.00	85.00	0.00	85.00	0.00	84.00	0.02	
10gr48_P2	2043.00	0.00	2043.00	0.00	2043.00	0.00	2043.00	0.00	20kroE100_P2	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4285.00	0.05	
10hk48_P1	41.00	0.00	41.00	0.00	41.00	0.00	41.00	0.00	20rat99_P1	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.01	87.00	0.01	85.00	0.05	
10hk48_P2	2145.00	0.00	2145.00	0.00	2145.00	0.00	2145.00	0.00	20rat99_P2	4524.00	0.00	4504.00	0.02	4430.00	0.04	4524.00	0.04	4524.00	0.03	
11berlin52_P1	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	20rd100_P1	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	
11berlin52_P2	2274.00	0.00	2274.00	0.00	2274.00	0.00	2274.00	0.00	20rd100_P2	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	
11eil51_P1	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	21eil101_P1	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	
11eil51_P2	2114.00	0.00	2114.00	0.00	2114.00	0.00	2114.00	0.00	21eil101_P2	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.01	
12brazil58_P1	53.00	0.00	53.00	0.00	53.00	0.00	53.00	0.00	21lin105_P1	88.00	0.00	87.00	0.03	87.00	0.03	87.00	0.03	87.00	0.05	
12brazil58_P2	2725.00	0.00	2725.00	0.00	2725.00	0.00	2725.00	0.00	21lin105_P2	4425.00	0.04	4425.00	0.06	4425.00	0.05	4300.00	0.10	4300.00	0.10	
14st70_P1	60.00	0.00	60.00	0.00	60.00	0.00	60.00	0.00	22pr107_P1	74.00	0.26	72.00	0.38	69.00	0.54	59.00	0.80	59.00	0.80	
14st70_P2	3010.00	0.00	3010.00	0.00	3010.00	0.00	3010.00	0.00	22pr107_P2	3574.00	0.27	3802.00	0.35	3646.00	0.47	2980.00	0.80	2980.00	0.80	
16eil76_P1	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	24gr120_P1	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.02	
16eil76_P2	3309.00	0.00	3309.00	0.00	3309.00	0.01	3309.00	0.01	24gr120_P2	5353.00	0.01	5164.00	0.09	5333.00	0.01	5165.00	0.06	5165.00	0.06	
16pr76_P1	68.00	0.00	68.00	0.00	68.00	0.01	68.00	0.01	25pr124_P1	105.00	0.04	105.00	0.03	105.00	0.00	102.00	0.14	102.00	0.14	
16pr76_P2	3477.00	0.00	3477.00	0.00	3477.00	0.01	3477.00	0.01	25pr124_P2	5309.00	0.08	5150.00	0.12	5356.00	0.04	5257.00	0.13	5257.00	0.13	
20gr96_P1	88.00	0.00	88.00	0.00	88.00	0.00	88.00	0.00	26bier127_P1	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	
20gr96_P2	4454.00	0.00	4454.00	0.00	4454.00	0.00	4454.00	0.00	26bier127_P2	6093.00	0.00	6093.00	0.00	6093.00	0.00	5961.00	0.03	5961.00	0.03	
20kroA100_P1	81.00	0.00	81.00	0.00	81.00	0.00	81.00	0.00	26ch130_P1	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	
20kroA100_P2	4102.00	0.00	4102.00	0.00	4102.00	0.02	4087.00	0.04	26ch130_P2	5718.00	0.00	5502.00	0.07	5663.00	0.02	5614.00	0.04	5614.00	0.04	
20kroB100_P1	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.04	82.00	0.04	28gr137_P1	125.00	0.00	125.00	0.00	125.00	0.02	123.00	0.03	123.00	0.03	
20kroB100_P2	4009.00	0.11	4061.00	0.10	4094.00	0.07	3846.00	0.17	28gr137_P2	6239.00	0.00	6239.00	0.01	6239.00	0.02	6170.00	0.04	6170.00	0.04	
20kroC100_P1	83.00	0.00	83.00	0.00	83.00	0.00	83.00	0.00	28pr136_P1	114.00	0.03	110.00	0.09	111.00	0.09	110.00	0.11	110.00	0.11	
20kroC100_P2	4150.00	0.00	4150.00	0.01	4150.00	0.03	4055.00	0.07	28pr136_P2	6113.00	0.04	6043.00	0.06	6113.00	0.04	5745.00	0.12	5745.00	0.12	

Çizelge 4 (devam).  $\omega=0.8$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
29pr144_P1	122.00	0.06	120.00	0.07	118.00	0.08	112.00	0.21	4br17_P1	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00
29pr144_P2	6133.00	0.06	5873.00	0.15	6133.00	0.07	5628.00	0.22	4br17_P2	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00
30ch150_P1	122.00	0.00	121.00	0.04	120.00	0.04	119.00	0.06	4gr17_P1	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00
30ch150_P2	6317.00	0.03	5439.00	0.23	6342.00	0.02	5997.00	0.10	4gr17_P2	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00
30kroA150_P1	124.00	0.00	124.00	0.01	124.00	0.00	123.00	0.03	4ulysses16_P1	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00
30kroA150_P2	6418.00	0.03	5905.00	0.15	6418.00	0.01	6383.00	0.04	4ulysses16_P2	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00
30kroB150_P1	129.00	0.00	129.00	0.00	129.00	0.00	126.00	0.05	5gr21_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
30kroB150_P2	6547.00	0.03	6547.00	0.05	6547.00	0.01	6131.00	0.11	5gr21_P2	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00
31pr152_P1	115.00	0.17	108.00	0.30	115.00	0.24	115.00	0.31	5gr24_P1	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00
31pr152_P2	5800.00	0.25	5387.00	0.37	5800.00	0.29	4978.00	0.54	5gr24_P2	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00
32u159_P1	135.00	0.02	132.00	0.07	137.00	0.02	135.00	0.04	5ulysses22_P1	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00
32u159_P2	6956.00	0.03	5860.00	0.25	7019.00	0.03	6351.00	0.16	5ulysses22_P2	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00
35si175_P1	141.00	0.01	139.00	0.04	140.00	0.02	136.00	0.05	6bayg29_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00
35si175_P2	7277.00	0.06	6935.00	0.12	7381.00	0.02	7170.00	0.06	6bayg29_P2	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	6bays29_P1	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	6bays29_P2	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	6fri26_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	6fri26_P2	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00
3burma14_P1	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	7ftv33_P1	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00
3burma14_P2	671.00	0.00	671.00	0.00	671.00	0.00	671.00	0.00	7ftv33_P2	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00
40d198_P1	171.00	0.09	170.00	0.12	171.00	0.14	171.00	0.15	8ftv36_P1	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00
40d198_P2	8628.00	0.11	6938.00	0.40	6361.00	0.56	5557.00	0.80	8ftv36_P2	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00
40kroa200_P1	170.00	0.00	168.00	0.04	169.00	0.03	166.00	0.05	8ftv38_P1	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00
40kroa200_P2	8526.00	0.03	7961.00	0.13	8609.00	0.02	7873.00	0.14	8ftv38_P2	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00
40krob200_P1	168.00	0.02	147.00	0.19	162.00	0.06	165.00	0.05	9dantzig42_P1	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.06
40krob200_P2	8851.00	0.02	6185.00	0.49	8851.00	0.01	8653.00	0.05	9dantzig42_P2	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.06

Çizelge 5.  $\omega=0.6$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	63.00	0.08
10att49_P2	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	2974.00	0.19
10gr48_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	59.00	0.15
10gr48_P2	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	3387.00	0.08
10hk48_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	60.00	0.15
10hk48_P2	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	3317.00	0.09
11berlin52_P1	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	66.00	0.00
11berlin52_P2	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	3497.00	0.02
11eil51_P1	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	70.00	0.00
11eil51_P2	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	3673.00	0.00
12brazil58_P1	48.00	0.00	48.00	0.00	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	67.00	0.16
12brazil58_P2	2426.00	0.00	2426.00	0.00	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2989.00	0.35
14st70_P1	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	53.00	0.72
14st70_P2	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2697.00	0.76
16eil76_P1	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	78.00	0.05
16eil76_P2	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	3812.00	0.15
16pr76_P1	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	82.00	0.15
16pr76_P2	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	3455.00	0.45
20gr96_P1	69.00	0.00	69.00	0.00	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	104.00	0.07
20gr96_P2	3525.00	0.00	3442.00	0.07	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	5145.00	0.06
20kroA100_P1	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	86.00	0.00
20kroA100_P2	2992.00	0.04	2992.00	0.03	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	4478.00	0.04
20kroB100_P1	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	87.00	0.18
20kroB100_P2	3047.00	0.20	3047.00	0.14	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	4358.00	0.22
20kroC100_P1	65.00	0.00	65.00	0.00	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	75.00	0.31
20kroC100_P2	3192.00	0.00	3192.00	0.00	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	4294.00	0.27

Çizelge 5 (devam).  $\omega=0.6$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C			
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap		
29pr144_P1	90.00	0.13	89.00	0.16	89.00	0.12	80.00	0.50	89.00	0.12	80.00	0.50	89.00	0.12	80.00	0.50	10.00	0.00	10.00	0.00
29pr144_P2	4542.00	0.18	3489.00	0.62	4328.00	0.24	3939.00	0.54	4328.00	0.24	3939.00	0.54	4328.00	0.24	3939.00	0.54	569.00	0.00	569.00	0.00
30ch150_P1	95.00	0.00	87.00	0.15	91.00	0.05	88.00	0.11	91.00	0.05	88.00	0.11	91.00	0.05	88.00	0.11	12.00	0.00	12.00	0.00
30ch150_P2	5062.00	0.00	4932.00	0.08	5062.00	0.00	5062.00	0.04	5062.00	0.00	5062.00	0.04	5062.00	0.00	5062.00	0.04	696.00	0.00	696.00	0.00
30kroA150_P1	95.00	0.00	89.00	0.16	95.00	0.00	95.00	0.02	95.00	0.00	95.00	0.02	95.00	0.00	95.00	0.02	11.00	0.00	11.00	0.00
30kroA150_P2	4660.00	0.14	3475.00	0.59	4740.00	0.09	4394.00	0.19	4740.00	0.09	4394.00	0.19	4740.00	0.09	4394.00	0.19	601.00	0.00	601.00	0.00
30kroB150_P1	96.00	0.07	42.00	1.64	98.00	0.04	91.00	0.13	98.00	0.04	91.00	0.13	98.00	0.04	91.00	0.13	14.00	0.00	14.00	0.00
30kroB150_P2	4969.00	0.13	4771.00	0.20	5009.00	0.06	4515.00	0.21	5009.00	0.06	4515.00	0.21	5009.00	0.06	4515.00	0.21	784.00	0.00	784.00	0.00
31pr152_P1	70.00	0.60	64.00	0.83	72.00	0.64	81.00	0.59	72.00	0.64	81.00	0.59	72.00	0.64	81.00	0.59	11.00	0.00	11.00	0.00
31pr152_P2	4705.00	0.21	4175.00	0.42	4732.00	0.28	4235.00	0.55	4732.00	0.28	4235.00	0.55	4732.00	0.28	4235.00	0.55	608.00	0.00	608.00	0.00
32u159_P1	106.00	0.05	99.00	0.15	89.00	0.26	96.00	0.18	89.00	0.26	96.00	0.18	89.00	0.26	96.00	0.18	17.00	0.00	17.00	0.00
32u159_P2	5479.00	0.08	4156.00	0.46	5479.00	0.07	4812.00	0.22	5479.00	0.07	4812.00	0.22	5479.00	0.07	4812.00	0.22	914.00	0.00	914.00	0.00
35si175_P1	105.00	0.04	103.00	0.06	103.00	0.05	104.00	0.05	103.00	0.05	104.00	0.05	103.00	0.05	104.00	0.05	18.00	0.00	18.00	0.00
35si175_P2	5472.00	0.12	4899.00	0.29	5707.00	0.02	5295.00	0.12	5707.00	0.02	5295.00	0.12	5707.00	0.02	5295.00	0.12	960.00	0.00	960.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.00	178.00	0.00	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	18.00	0.00	18.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.00	9035.00	0.00	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	860.00	0.00	860.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	750.00	0.00	750.00	0.00
3burma14_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00
3burma14_P2	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	1028.00	0.00	1028.00	0.00
40d198_P1	112.00	0.41	115.00	0.37	128.00	0.27	110.00	0.52	128.00	0.27	110.00	0.52	128.00	0.27	110.00	0.52	21.00	0.00	21.00	0.00
40d198_P2	6738.00	0.21	4452.00	0.84	7120.00	0.16	5636.00	0.52	7120.00	0.16	5636.00	0.52	7120.00	0.16	5636.00	0.52	1109.00	0.00	1109.00	0.00
40kroa200_P1	128.00	0.09	122.00	0.16	127.00	0.08	121.00	0.13	127.00	0.08	121.00	0.13	127.00	0.08	121.00	0.13	24.00	0.00	24.00	0.00
40kroa200_P2	6449.00	0.11	5816.00	0.28	6651.00	0.06	5347.00	0.33	6651.00	0.06	5347.00	0.33	6651.00	0.06	5347.00	0.33	1326.00	0.00	1326.00	0.00
40krob200_P1	120.00	0.15	110.00	0.28	100.00	0.35	119.00	0.13	100.00	0.35	119.00	0.13	100.00	0.35	119.00	0.13	30.00	0.00	30.00	0.00
40krob200_P2	6259.00	0.20	5488.00	0.51	6789.00	0.08	6259.00	0.19	6789.00	0.08	6259.00	0.19	6789.00	0.08	6259.00	0.19	1594.00	0.00	1594.00	0.00

Çizelge 6.  $\omega=0.4$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	44.00	0.00
10att49_P2	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.02	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	2231.00	0.00	2231.00	0.00
10gr48_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	45.00	0.00	43.00	0.07
10gr48_P2	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1959.00	0.21	1932.00	0.32
10hk48_P1	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	42.00	0.00	37.00	0.22
10hk48_P2	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	2210.00	0.06	2210.00	0.09
11berlin52_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.14
11berlin52_P2	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	2367.00	0.11	2367.00	0.13
11eil51_P1	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	49.00	0.00	49.00	0.00
11eil51_P2	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	2488.00	0.00	2488.00	0.00
12brazil58_P1	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	47.00	0.11	40.00	0.38
12brazil58_P2	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	2151.00	0.44	2047.00	0.44
14st70_P1	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	41.00	0.34	41.00	0.49
14st70_P2	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	2123.00	0.39	2123.00	0.50
16eil76_P1	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	53.00	0.11	50.00	0.12
16eil76_P2	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.03	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.00	2519.00	0.30	2815.00	0.04
16pr76_P1	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.18	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.00	60.00	0.07	59.00	0.14
16pr76_P2	1787.00	0.00	1750.00	0.22	1750.00	0.17	1750.00	0.24	1750.00	0.14	1750.00	0.24	1750.00	0.14	2011.00	0.82	2676.00	0.37
20gr96_P1	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.02	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.00	85.00	0.05	80.00	0.10
20gr96_P2	2314.00	0.00	2314.00	0.06	2314.00	0.00	2314.00	0.05	2314.00	0.00	2314.00	0.00	2314.00	0.00	3752.00	0.25	4022.00	0.10
20kroA100_P1	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	55.00	0.11	57.00	0.00
20kroA100_P2	1989.00	0.00	1788.00	0.22	1989.00	0.00	1725.00	0.30	1989.00	0.00	1725.00	0.00	1989.00	0.00	2970.00	0.17	3170.00	0.04
20kroB100_P1	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	58.00	0.12	56.00	0.27
20kroB100_P2	2229.00	0.07	2193.00	0.18	2229.00	0.00	2158.00	0.20	2229.00	0.00	2158.00	0.20	2229.00	0.00	2727.00	0.40	2866.00	0.29
20kroC100_P1	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.38	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	48.00	0.31	47.00	0.40
20kroC100_P2	2048.00	0.00	1700.00	0.40	2048.00	0.04	1671.00	0.42	2048.00	0.04	1671.00	0.31	2048.00	0.04	2736.00	0.40	2543.00	0.48



Çizelge 6 (devam).  $\omega=0.4$  için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
29pr144_P1	56.00	0.34	58.00	0.22	58.00	0.19	43.00	1.12	4br17_P1	7.00	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00
29pr144_P2	2690.00	0.53	2590.00	0.57	2632.00	0.44	2510.00	0.92	4br17_P2	372.00	0.00	372.00	0.00	372.00	0.00	372.00	0.00
30ch150_P1	65.00	0.00	56.00	0.25	65.00	0.00	55.00	0.24	4gr17_P1	9.00	0.00	9.00	0.00	9.00	0.00	9.00	0.00
30ch150_P2	3493.00	0.01	3453.00	0.09	3114.00	0.18	3133.00	0.22	4gr17_P2	476.00	0.00	476.00	0.00	476.00	0.00	476.00	0.00
30kroA150_P1	59.00	0.15	49.00	0.45	62.00	0.00	60.00	0.10	4ulysses16_P1	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00
30kroA150_P2	2972.00	0.25	2898.00	0.33	2830.00	0.27	2874.00	0.25	4ulysses16_P2	343.00	0.00	343.00	0.00	343.00	0.00	343.00	0.00
30kroB150_P1	60.00	0.17	49.00	0.55	58.00	0.19	56.00	0.29	5gr21_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
30kroB150_P2	2760.00	0.49	2307.00	0.79	2692.00	0.38	3216.00	0.19	5gr21_P2	552.00	0.00	552.00	0.00	552.00	0.00	552.00	0.00
31pr152_P1	48.00	0.63	44.00	0.82	44.00	0.91	42.00	1.21	5gr24_P1	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00
31pr152_P2	1951.00	1.31	1862.00	1.37	2408.00	0.82	2129.00	1.25	5gr24_P2	347.00	0.00	347.00	0.00	347.00	0.00	347.00	0.00
32u159_P1	60.00	0.37	61.00	0.34	64.00	0.22	56.00	0.46	5ulysses22_P1	11.00	0.00	11.00	0.00	11.00	0.00	11.00	0.00
32u159_P2	3403.00	0.33	2085.00	1.21	3209.00	0.30	2665.00	0.63	5ulysses22_P2	602.00	0.00	602.00	0.00	602.00	0.00	602.00	0.00
35si175_P1	71.00	0.03	67.00	0.10	71.00	0.03	68.00	0.09	6bayg29_P1	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
35si175_P2	3573.00	0.23	3355.00	0.38	3733.00	0.07	3572.00	0.14	6bayg29_P2	514.00	0.00	514.00	0.00	514.00	0.00	514.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.00	178.00	0.00	178.00	0.01	178.00	0.01	6bays29_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.00	9035.00	0.00	9035.00	0.01	9035.00	0.01	6bays29_P2	446.00	0.00	446.00	0.00	446.00	0.00	446.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	6fri26_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	6fri26_P2	408.00	0.00	408.00	0.00	408.00	0.00	408.00	0.00
3burma14_P1	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	7ftv33_P1	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00
3burma14_P2	162.00	0.00	162.00	0.00	162.00	0.00	162.00	0.00	7ftv33_P2	881.00	0.00	881.00	0.00	881.00	0.00	881.00	0.00
40d198_P1	69.00	0.51	60.00	0.80	73.00	0.47	62.00	0.77	8ftv36_P1	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00
40d198_P2	3373.00	0.66	3514.00	0.65	3272.00	0.71	3004.00	0.90	8ftv36_P2	807.00	0.00	807.00	0.00	807.00	0.00	807.00	0.00
40kroa200_P1	85.00	0.15	75.00	0.35	87.00	0.06	87.00	0.09	8ftv38_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
40kroa200_P2	4082.00	0.27	3957.00	0.37	4212.00	0.17	3649.00	0.40	8ftv38_P2	982.00	0.00	982.00	0.00	982.00	0.00	982.00	0.00
40kroB200_P1	83.00	0.19	43.00	1.33	85.00	0.07	72.00	0.31	9dantzig42_P1	17.00	0.00	17.00	0.00	17.00	0.00	17.00	0.06
40kroB200_P2	4391.00	0.20	3747.00	0.53	4705.00	0.06	3595.00	0.48	9dantzig42_P2	943.00	0.00	943.00	0.00	943.00	0.00	943.00	0.00

Çizelge 7. 10att48 ve 16eil76 problemlerinin farklı  $\omega$  değerlerine göre çözümleri

Problem	$n$	$k$	$\omega$	P1/P2	$T_{max}$	Eniyi Amaç F. Değeri	Çözüm Süresi (sn.)	Salkım	Tur Süresi	Tur
10att48	48	11	T40	P1	4606	21	81	2	4534	1 36 7 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 3 22 1
10att48	48	11	T40	P2	4606	1001	7588	2	4534	1 36 7 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 3 22 1
10att48	48	11	T60	P1	6909	33	21	4	6745	1 8 9 15 33 46 38 31 44 18 7 36 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 22 3 34 41 16 1
10att48	48	11	T60	P2	6909	1666	99	4	6848	1 8 9 46 33 15 38 31 44 18 7 36 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 22 3 34 41 16 1
10att48	48	11	T80	P1	9212	40	40	6	9191	1 8 9 38 15 33 46 31 44 18 28 6 37 19 27 17 43 30 7 36 20 12 40 22 3 23 14 25 13 11 47 21 32 39 48 5 42 29 34 41 16 1
10att48	48	11	T80	P2	9212	2029	224	6	9157	1 16 41 34 29 42 5 48 32 39 21 47 13 25 14 23 3 22 40 11 12 20 36 30 43 17 27 19 37 6 28 7 18 44 31 38 46 33 15 9 8 1
10att48	48	11	T100	P1	11516	47	123	10	11516	1 8 9 15 33 46 38 31 44 18 7 28 6 37 19 27 17 43 30 36 20 47 11 12 40 22 3 23 14 25 13 21 39 32 24 10 45 35 4 26 2 42 48 5 29 34 41 16 1
10att48	48	11	T100	P2	11516	2422	182	10	11516	1 8 9 15 33 46 38 31 44 18 7 28 6 37 19 27 17 43 30 36 20 47 11 12 40 22 3 23 14 25 13 21 39 32 24 10 45 35 4 26 2 42 48 5 29 34 41 16 1
16eil76	76	17	T40	P1	234	32	417	5	228	1 43 22 62 73 33 63 16 49 24 18 50 3 44 32 9 39 40 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T40	P2	234	1892	989	5	230	1 63 33 73 62 22 43 41 56 23 24 49 16 40 39 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T60	P1	352	48	1265	8	351	1 23 56 41 43 63 33 73 62 22 61 28 74 48 21 47 36 69 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 14 53 35 7 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 1
16eil76	76	17	T60	P2	352	2670	5360	8	351	1 23 56 41 43 22 62 73 33 63 16 49 24 18 50 44 3 32 9 39 40 17 26 12 72 58 31 10 38 53 14 35 7 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 1
16eil76	76	17	T80	P1	469	64	78	12	468	1 23 56 41 42 64 61 28 74 48 47 21 69 36 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 14 53 7 35 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 17 26 12 40 39 9 32 3 44 50 18 24 49 16 63 33 73 62 22 43 1
16eil76	76	17	T80	P2	469	3309	2299	11	467	1 28 61 21 69 36 47 48 74 2 30 45 4 75 68 6 51 76 67 34 46 52 13 54 19 8 35 7 53 14 11 66 65 38 31 10 58 72 39 40 12 26 17 3 44 32 9 50 18 24 49 16 63 33 73 62 22 43 41 56 23 1
16eil76	76	17	T100	P1	587	75	286	16	587	1 43 22 62 73 33 63 16 49 24 23 56 41 42 64 61 28 74 21 48 47 36 69 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 8 35 7 53 14 59 11 66 65 38 10 58 72 31 25 55 18 50 3 44 32 9 39 40 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T100	P2	587	3800	770	16	587	1 2 30 45 4 34 46 67 76 75 68 6 51 17 26 12 40 39 9 32 44 3 50 18 55 25 31 72 58 10 38 65 66 11 59 14 53 7 35 8 19 54 13 52 27 57 15 29 5 37 20 70 60 71 36 69 21 47 48 74 28 61 64 42 41 56 23 24 49 16 63 33 73 62 22 43 1

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar1: Metodoloji, fikir sahibi, araştırma

Yazar2: Kaynaklar, yazma, biçimsel analiz, görselleştirme

Yazar3: Deneysel, kaynaklar, yazma, biçimsel analiz, görselleştirme

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

## 6. Kaynaklar

- Angelelli, E., Archetti, C., and Vindigni, M., 2014. The clustered orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **238(2)**, 404-414.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.006>
- Anily, S., Bramel, J., and Hertz, A., 1999. A 53-approximation algorithm for the clustered traveling salesman tour and path problems. *Operations Research Letters*, **24(1-2)**, 29-35.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(98\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(98)00046-7)
- Archetti, C., Bianchessi, N., and Speranza, M. G., 2013. Optimal solutions for routing problems with profits. *Discrete Applied Mathematics*, **161(4)**, 547-557.  
<https://doi.org/10.1016/j.dam.2011.12.021>
- Archetti, C., Carrabs, F., and Cerulli, R., 2018. The set orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **267(1)**, 264-272.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.009>
- Arkin, E. M., Hassin, R., and Klein, L., 1997. Restricted delivery problems on a network. *Networks: An International Journal*, **29(4)**, 205-216.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0037\(199707\)29:4<205::AID-NET3>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(199707)29:4<205::AID-NET3>3.0.CO;2-J)
- Balas, E., 1989. The prize collecting traveling salesman problem. *Networks*, **19(6)**, 621-636.  
<https://doi.org/10.1002/net.3230190602>
- Bao, X., and Liu, Z., 2012. An improved approximation algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Information Processing Letters*, **112(23)**, 908-910.  
<https://doi.org/10.1016/j.ipl.2012.08.020>
- Carrabs, F., 2021. A biased random-key genetic algorithm for the set orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **292(3)**, 830-854.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.043>
- Chisman, J. A., 1975. The clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, **2(2)**, 115-119.  
[https://doi.org/10.1016/0305-0548\(75\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0305-0548(75)90015-5)
- Dell'Amico, M., Maffioli, F., and Värbrand, P., 1995. On prize collecting tours and the asymmetric travelling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, **2(3)**, 297-308.  
<https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1995.tb00023.x>
- Derya, T., Dinler, E., and Keçeci, B., 2020. Selective generalized travelling salesman problem. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, **26(1)**, 80-118.  
<https://doi.org/10.1080/13873954.2019.1705496>
- Derya, T., Keçeci, B., and Dinler, E., 2023. Selective clustered traveling salesman problem. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, **10(1)**, 2235266.  
<https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2235266>
- Ding, C., Cheng, Y., and He, M., 2007. Two-level genetic algorithm for clustered traveling salesman problem with application in large-scale TSPs. *Tsinghua Science & Technology*, **12(4)**, 459-465.  
[https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(07\)70068-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70068-8)
- Feillet, D., Dejax, P., and Gendreau, M., 2005. Traveling salesman problems with profits. *Transportation science*, **39(2)**, 188-205.  
<https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0079>
- Fischetti, M., Salazar González, J. J., and Toth, P., 1997. A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem. *Operations Research*, **45(3)**, 378-394.  
<https://doi.org/10.1287/opre.45.3.378>
- Gavish, B., and Graves, S. C., 1978. The travelling salesman problem and related problems. Working Paper GR-078-78, Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology.
- Gendreau, M., Laporte, G., and Hertz, A., 1997. An approximation algorithm for the traveling salesman problem with backhauls. *Operations Research*, **45(4)**, 639-641.  
<https://doi.org/10.1287/opre.45.4.639>

- Gendreau, M., Laporte, G., and Potvin, J. Y., 1994. Heuristics for the clustered traveling salesman problem (No. CRT-94-54).
- Ghaziri, H., and Osman, I. H., 2003. A neural network algorithm for the traveling salesman problem with backhauls. *Computers & Industrial Engineering*, **44(2)**, 267-281.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00179-1)
- Golden, B. L., Levy, L., and Vohra, R., 1987. The orienteering problem. *Naval research logistics*, **34(3)**, 307-318.  
[https://doi.org/10.1002/1520-6750\(198706\)34:3<307::AID-NAV3220340302>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1520-6750(198706)34:3<307::AID-NAV3220340302>3.0.CO;2-D)
- Gunawan, A., Lau, H. C., and Vansteenwegen, P., 2016. Orienteering problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications. *European Journal of Operational Research*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.059>
- Guttmann-Beck, N., Hassin, R., Khuller, S., and Raghavachari, B., 2000. Approximation algorithms with bounded performance guarantees for the clustered traveling salesman problem. *Algorithmica*, **23(4)**, 422-437.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.059>
- Jepsen, M. K., Petersen, B., Spoorendonk, S., and Pisinger, D., 2014. A branch-and-cut algorithm for the capacitated profitable tour problem. *Discrete Optimization*, **14**, 78-96.  
<https://doi.org/10.1016/j.disopt.2014.08.001>
- Jongens, K., and Volgenant, T., 1985. The symmetric clustered traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, **19(1)**, 68-75.  
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90309-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90309-1)
- Juan, A. A., Lourenço, H. R., Mateo, M., Luo, R., and Castella, Q., 2014. Using iterated local search for solving the flow-shop problem: parallelization, parametrization, and randomization issues. *International Transactions in Operational Research*, **21(1)**, 103-126.  
<https://doi.org/10.1111/itor.12028>
- Laporte, G., ve Palekar, U., 2002. Some applications of the clustered travelling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, **53(9)**, 972-976.  
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601420>
- Laporte, G., Potvin, J. Y., and Quilleret, F., 1997. A tabu search heuristic using genetic diversification for the clustered traveling salesman problem. *Journal of Heuristics*, **2(3)**, 187-200.  
<https://doi.org/10.1007/BF00127356>
- Lokin, F. C. J., 1979. Procedures for travelling salesman problems with additional constraints. *European Journal of Operational Research*, **3(2)**, 135-141.  
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(79\)90099-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(79)90099-7)
- López-Ibáñez, M., Mascia, F., Marmion, M. É., and Stützle, T., 2014, July. A template for designing single-solution hybrid metaheuristics. In *Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (pp. 1423-1426).  
<https://doi.org/10.1145/2598394.2609846>
- Mestria, M., Ochi, L. S., and de Lima Martins, S., 2013. GRASP with path relinking for the symmetric euclidean clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, **40(12)**, 3218-3229.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.10.001>
- Mestria, M., 2016. A hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Pesquisa Operacional*, **36(1)**, 113-132.  
<https://doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.01.0113>
- Mestria, M., 2018. New hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Computers & Industrial Engineering*, **116**, 1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.018>
- Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A., 1960. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, **7(4)**, 326-329.  
<https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Pedro, O., Saldanha, R., and Camargo, R., 2013. A tabu search approach for the prize collecting traveling salesman problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, **41**, 261-268.  
<https://doi.org/10.1016/j.endm.2013.05.101>
- Pěnička, R., Faigl, J., ve Saska, M., 2019. Variable neighborhood search for the set orienteering problem and its application to other orienteering problem variants. *European Journal of Operational Research*, **276(3)**, 816-825.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.047>

- Potvin, J. Y., and Guertin, F., 1996. The clustered traveling salesman problem: A genetic approach. *In Meta-Heuristics* (pp. 619-631). Springer, Boston, MA.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1361-8\\_37](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1361-8_37)
- Souffriau, W., Vansteenwegen, P., Vertommen, J., Berghe, G. V., and Oudheusden, D. V., 2008. A personalized tourist trip design algorithm for mobile tourist guides. *Applied Artificial Intelligence*, **22(10)**, 964-985.  
<https://doi.org/10.1080/08839510802379626>
- Thomadsen, T., and Stidsen, T. K., 2003. The quadratic selective travelling salesman problem. *Informatics and Mathematical Modelling Technical Report 2003-17*, Technical University of Denmark.
- Tsiligrirides, T., 1984. Heuristic methods applied to orienteering. *Journal of the Operational Research Society*, **35(9)**, 797-809.  
<https://doi.org/10.1057/jors.1984.162>
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., and Van Oudheusden, D., 2011. The orienteering problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, **209(1)**, 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.045>
- Vansteenwegen, P., and Van Oudheusden, D., 2007. The mobile tourist guide: an OR opportunity. *OR insight*, **20(3)**, 21-27.  
<https://doi.org/10.1057/ori.2007.17>
- Verbeeck, C., Aghezzaf, E. H., and Vansteenwegen, P., 2016. Solving the stochastic time-dependent orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, **255**, 699-718.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.031>
- Weintraub, A., Aboud, J., Fernandez, C., Laporte, G., and Ramirez, E., 1999. An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile. *Journal of the Operational Research Society*, **50(7)**, 690-696.  
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600746>
- Yahiaoui, A. E., Moukrim, A., and Serairi, M., 2017. Hybrid heuristic for the clustered orienteering problem. *In Computational Logistics: 8th International Conference, ICCL 2017, Southampton, UK, October 18-20, 2017, Proceedings 8* (pp. 19-33). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-68496-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68496-3_2)
- Zhang, W., Wang, K., Wang, S., and Laporte, G., 2020. Clustered coverage orienteering problem of unmanned surface vehicles for water sampling. *Naval Research Logistics*, **67(5)**, 353-367.  
<https://doi.org/10.1002/nav.21906>