

Kent içi lojistiğinde gezgin satın alıcı problemi için geliştirilmiş TOPSIS tabanlı çözüm yaklaşımı

İlker KÜÇÜKOĞLU*

Bursa Uludağ Üniversitesi Müh. Fak. Endüstri Müh. Böl., Görükle kampüsü, Bursa.

Geliş Tarihi (Received Date): 09.05.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 08.08.2025

Öz

Günümüzde artan rekabet koşulları altında firmalar rekabet gücünü koruyabilmek için üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla birçok planlama yapmaktadır. Bunlar arasında ulaştırma ve satın alma maliyetleri ön plana çıkan faaliyetler olarak bilinmektedir. Özellikle taşımaların yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği kent içi lojistikte uygun tedarikçilerin seçimi ve rotaların iyi bir şekilde planlanması ile maliyetler üzerinde önemli tasarruflar sağlanabilmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmada, tedarikçi seçimi, ürün tedariki ve rota planlamasını dikkate alan gezgin satın alıcı problemi (GSAP), kent içi lojistik faaliyetleri için dikkate alınmıştır. Dikkate alınan problemin çözümü için çok kriterli karar verme yöntemine dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımında tedarikçiler ellerinde bulundurdukları ürün miktarları ve ürün fiyatları üzerinden TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmaktadır. Ziyaret edilecek tedarikçiler kümesi belirlendikten sonra satın alıcının rotası, üç ayrı tur kurucu yöntem (en yakın komşu algoritması, tasarruf algoritması, ekleme yöntemi) ile elde edilmekte ve bunlar içerisinde en iyi sonucu veren rota seçilmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda, geliştirilmiş olan yaklaşımlar rassal olarak üretilmiş problemlerden oluşan veri seti üzerinde test edilmiştir. Üretilen veri seti 30 market ve 30 ürün çeşidine kadar farklı büyüklüklerde 90 problem içermektedir. Veri seti için elde edilen sonuçlara göre, üç farklı çözüm yaklaşımının GUROBI çözücüsü ile elde edilen optimum sonuçlara %5'ten daha düşük farklar ile sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Ek olarak, yapılan karşılaştırmalar neticesinde ekleme algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar kent içi lojistiğine ait pratik uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımı ile satın alma ve rota planlamaları için optimum veya optimuma yakın sonuçlar üretilebilmektedir. Diğer yandan, literatürde TOPSIS yöntemi ve bir tur kurucu yönteminin ilk defa dikkate alındığı bu çözüm yaklaşımı ile iteratif olarak çözüm iyileştiren diğer yaklaşımlara göre çok kısa sürelerde sonuç elde etmek mümkündür.

Anahtar kelimeler: Çok kriterli karar verme, kent içi lojistik, rotalama problemi, tedarikçi seçimi.

* İlker KÜÇÜKOĞLU, ikucukoglu@uludag.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-5075-0876>

TOPSIS-based solution approach for the traveling purchaser problem in urban logistics

Abstract

Nowadays, with the increasing competitive conditions, companies make many plans to reduce production costs in order to maintain their competitive power. Among these, transportation and purchasing costs are known as the prominent activities. Especially in urban logistics where transportation is carried out intensively, significant savings can be achieved on costs by selecting suitable suppliers and planning the routes well. In this context, the traveling purchaser problem (TPP), which takes into account supplier selection, product supply, and route planning, is taken into account for urban logistics activities. A solution approach based on a multi-criteria decision-making method has been developed. In the developed solution approach, suppliers are ranked using the TOPSIS method based on the product quantities and product prices they hold. After the set of suppliers to be visited is determined, the purchaser's route is obtained through three different tour construction methods (nearest neighborhood algorithm, savings algorithm, insertion method), and the route that gives the best result is selected. In the numerical studies, the developed approaches are tested on a dataset consisting of randomly generated problems. The generated dataset includes 90 problems of varying sizes, up to 30 markets and 30 product types. In the numerical studies, it was determined that the solution approaches produced results with differences of less than 5% to the optimum results obtained with the GUROBI solver. Additionally, as a result of the comparisons made, it was seen that the insertion algorithm achieved better results than the other two algorithms. When the results are evaluated in terms of practical applications in urban logistics, the developed solution approach can produce optimal or near-optimal results for purchasing and route planning. Furthermore, this solution approach, which for the first time considers the TOPSIS method and a tour construction method in the literature, enables results to be achieved in much shorter times compared to other approaches that iteratively improve solutions.

Keywords: Multi-criteria decision-making, urban logistics, routing problem, supplier selection.

1. Giriş

Günümüzde kent içi lojistik, şehirlerin artan nüfusları ve ekonomik faaliyetleriyle doğru orantılı olarak giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Ek olarak e-ticaretin hızlı büyümesi ve tüketici taleplerinin çeşitlenmesi, lojistik ve tedarik zincirinin verimli bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, kent içi lojistikte yapılan satın alma işlemleri, operasyonel maliyetleri ve hizmet kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Bir tedarikçinin seçilmesi, tedarik edilen ürünlerin maliyeti, kalitesi ve teslimat süreleri gibi çeşitli unsurları dikkate almayı gerektirir. Bu kapsamda Gezgın Satın Alıcı Problemi (GSAP), klasik Gezgın Satıcı Probleminin genişletilmiş bir hali olarak tedarikçi seçimi ve ürün tedarigi gibi lojistik süreçlerin etkin bir şekilde planlanmasını amaçlamaktadır.

GSAP ilk kez Ramesh [1] tarafından öne sürülmüştür olup problemde amaç belirli ürünleri farklı lokasyonlarda bulunan marketlerden temin edecek en düşük maliyetli rota ve satın alma planının oluşturulmasıdır. Problemde; ziyaret edilecek market kümesi, marketlerin ziyaret edilme sırası, marketlerden satın alınacak ürün çeşidi ve miktarı kararlarının verilmesi gerekmektedir. Dikkate alınan bu karar süreçleri kapsamında GSAP NP-Zor yapıda bir problem olarak gösterilmektedir [2].

Gezgin Satın Alıcı Problemi (GSAP), ilk ortaya atıldığı tarihten itibaren farklı varsayımlar ve kısıtlar çerçevesinde literatürde çeşitli şekillerde genişletilmiştir. Ramesh [1] tarafından önerilen orijinal problem yapısında, marketlerde bulunan ürünlerin sayıca sınırlı olduğu ve bir ürünün ihtiyacını karşılayabilmek için satın alıcının birden fazla marketten alım yapabileceği varsayılmıştır. Bu yapı, literatürde “kapasiteli GSAP” olarak adlandırılmaktadır. Buna karşılık, ürün stoklarının talepten fazla olduğu senaryolar "kapasitesiz GSAP" olarak çalışılmıştır [3-6]. Her bir ürünün talep miktarının bire eşit olması durumunda ise, kapasiteli GSAP doğrudan kapasitesiz versiyona indirgenebilmektedir. Bu temel yapıların yanı sıra, Gouveia vd. [7], marketlerden alınabilecek ürün miktarı için üst sınır getiren bir model geliştirmiştir.

GSAP'den esinlenerek geliştirilen bir diğer problem türü ise okul aracı rotalama problemi olmuştur [8]. Bu problemde, otobüslerin duraklarda alması gereken öğrenci sayısı için alt limitler tanımlanmıştır ve her durakta yeterli sayıda öğrenci bulunması gerekliliği dikkate alınmıştır. Böylece GSAP, yalnızca ticari lojistik süreçlerde değil, kamuya yönelik taşıma sistemlerinde de farklılaştırılmış biçimlerde uygulanabilirliğini göstermiştir.

Öte yandan, yalnızca market temelli kısıtlamalar değil, aynı zamanda rotalama ile ilişkili pratik kısıtlamalar da GSAP'nin zenginleştirilmesine katkı sağlamıştır. Bu çerçevede, Choi ve Lee [4], kullanılan aracın kapasitesini dikkate alarak çok araçlı GSAP (multi-vehicle GSAP) modelini önermiştir. Bu yapı, birden fazla aracın eş zamanlı olarak görev almasına olanak tanımaktadır. Daha sonra Roy vd. [9], marketlerin kümelendiği ve her kümeye bir araç tahsis edildiği bir yapı önermiştir. Batista-Galván vd. [10], araçların belirli bölmelere ayrıldığını ve her bölmenin ayrı bir kapasite sınırına sahip olduğunu varsayımlardır. Manerba ve Mansini [11] ise, taşınacak ürünlerin birbirleriyle uyumsuz olabileceğini ve bu ürünlerin aynı araçta taşınamayacağı senaryosu üzerinden modeli genişletmiştir. Bianchessi vd. [12] tarafından yapılan bir diğer katkıda, araçların menzil kısıtı olduğu ve bu sınıra ulaşıldığında araçların tekrar başlangıç noktasına dönerek yeni bir tura çıkabileceği durumu ele alınmıştır.

GSAP'nin literatürde genişletildiği diğer yönlerden biri de farklı bakış açılarıyla modele entegre edilen yeni kısıtlar olmuştur. Örneğin, Mansini ve Tocchella [13], satın alıcının bütçesinin sınırlı olduğunu ve toplam satın alma maliyetinin bu bütçeyi aşmaması gerektiğini savunmuşlardır. Gouveia vd. [7], satın alıcının ziyaret edebileceği market sayısını sınırlayan bir üst limit tanımlamışlardır. Kucukoglu [14], satın alıcının toplam tur süresinin belirli bir üst sınırı aşmaması gerektiğini belirten bir zaman kısıtı önermiştir. Ayrıca, Cheaitou vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, rotaların karbon salınımı temelinde oluşturulması gerektiği ifade edilerek, çevresel sürdürülebilirlik GSAP çerçevesine entegre edilmiştir.

GSAP'nin farklı türevlerinin yanı sıra, bu problemlerin çözümü için literatürde çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir [2]. Temel olarak bu yaklaşımlar, optimal sonuç

sağlayan deterministik yöntemler ve kısa sürede iyi kalitede çözümler üretebilen sezgisel ya da meta-sezgisel yöntemler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Optimal yöntemler küçük boyutlu problemlerde etkili olmasına rağmen, problem boyutu büyüdükçe çözüm süresi açısından yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle sezgisel/meta-sezgisel yöntemler kısa sürelerde sonuç elde edebilmek açısından avantaj sağlamaktadır.

Mevcut literatürde GSAP için önerilmiş geliştirilmiş tasarruf algoritması [16], tur azaltma yaklaşımı [17], ürün ekleme yaklaşımı [18] gibi çözüm kurucu yöntemlere ek olarak genetik algoritma [19], tabu arama algoritması [6], tavlama benzetimi algoritması [20], değişken komşuluk arama algoritması [21] gibi meta-sezgisel yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemler içerisinde meta-sezgisel tabanlı çözüm yaklaşımları kesin çözüm veren yöntemlere göre çok daha kısa sürelerde optimum veya optimum sonuca yakın sonuçlar üretebilmektedir. Fakat problem boyutu arttığında bu yöntemlerin de etkin sonuç üretebilmesi için dakika bazında işlem yapması gerekmektedir. Özellikle kent içi lojistiğinde artan satın alma işlemleri dikkate alındığında planlama faaliyetlerinin çok daha kısa sürede yanıt verecek yöntemler ile yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

GSAP'nin çözüm süreci dikkate alındığında verilmesi gereken iki önemli karar ziyaret edilecek marketlerin seçilmesi (tedarikçi seçimi) ve bu marketlerin ziyaret sırasının belirlenmesidir (rota planlaması). Bu kapsamda tedarikçi seçimi bir algoritma için çözüm sürecini zorlaştıran en önemli faktördür. Ziyaret edilecek marketlerin belirli olması durumunda rota planı klasik gezgin satıcı problemi bazında oluşturulabilmektedir. Klasik bir gezgin satıcı problemi için ise literatürde yer alan meta-sezgisel yaklaşımlar ile saniyeler içerisinde etkin sonuçlar üretilebilmektedir. Benzer şekilde ziyaret edilecek marketlerin belirli olması durumunda marketler arasında en düşük maliyetli ürünleri belirleyerek optimum satın alma planını oluşturmak mümkündür. Bu nedenle, alternatif marketler arasından ziyaret edilmesi gereken marketlerin belirlenmesi problemin çözüm süreci için kritik bir öneme sahiptir.

Belirli marketler arasından ziyaret edilecek marketlerin belirlenmesinde markerlerde bulunan ürün çeşidi, miktarı ve fiyatına ek olarak marketlerin bulunduğu konuma bağlı olarak ulaşım maliyeti gibi birçok faktör kararı etkilemektedir. Bu kapsamda çok kriterli karar verme yöntemleri rotalama problemleri içerisinde belirli bir seçimi gerçekleştirmek için günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yakın zamanda yapılan çalışmalardan Nasution ve ark. [22] analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemini kullanarak zaman pencereli araç rotalama probleminde ziyaret edilecek hedef noktaların seçimini yapmışlardır. AHP yöntemi, Bakioğlu [23] tarafından yapılan çalışmada yeşil araç rotalama probleminde farklı senaryoların değerlendirilebilmesi için kullanılmıştır. Yapılan başka bir çalışmada TOPSIS yöntemi, çok amaçlı araç rotalama probleminin çözümünde geliştirilmiş olan algoritmada başlangıç çözümünün oluşturulması için kullanılmıştır [24]. Benzer bir konuda Maneengam [25], TOPSIS metodunu kullanarak çok amaçlı araç rotalama probleminde amaç fonksiyonlarının değerlendirilmesi için kullanmıştır. Yakın zamanda yapılan bu çalışmalara ek olarak literatürde AHP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE gibi başarisı kanıtlanmış çok kriterli karar verme yöntemlerinin lojistik alanında da sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [26, 27].

GSAP açısından marketlerin çok kriterli karar verme yöntemleri ile seçimi dikkate alındığında TOPSIS yönteminin diğer yöntemlere göre önemli avantajları bulunmaktadır. TOPSIS, alternatifleri ideal ve negatif ideal çözümlere olan geometrik uzaklıklarına göre sıralayan, doğrudan ve hesaplama açısından verimli bir yaklaşımdır. Bu özellik, birimler

ve ölçekler açısından farklılık gösteren kriterlerin yer aldığı GSAP için uygulamada büyük kolaylık sağlamaktadır. Ek olarak TOPSIS doğrudan normalize edilmiş karar matrisi ile çalıştığından karar vericiye daha az bağımlı veri gerektirir. Diğer yandan TOPSIS yöntemi uygun olmayan alternatifleri elemek yerine alternatifleri ideal çözüme yakınlıklarına göre sıraya koyarak karar vericiye bir seçenek sunmaktadır. GSAP bazında dikkate alındığında marketlerin ideal çözüme uzaklığına göre sıralanması, ürün talebine bağlı olarak marketlerin sırayla çözüme katılması açısından imkan sağlamaktadır.

Yukarıda belirtilmiş olan motivasyondan yola çıkarak yapılan bu çalışmada, literatürde iyi bilinen gezgin satın alıcı problemi (GSAP) için çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisi olan TOPSIS yöntemine dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımı üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada TOPSIS yöntemi ile marketlerin önem sırası farklı kriterler üzerinden belirlenmektedir. İkinci aşamada, TOPSIS yöntemi ile sıralanmış marketlere göre satın alma planlaması yapılmaktadır. Son aşamada ise gezgin satıcı problemi için geliştirilmiş tur kurucu yöntemler üzerinden en iyi rota planı belirlenmektedir. Bu kapsamda kullanılan yöntemler; en yakın komşu algoritması (nearest neighborhood algorithm-NNA), tasarruf algoritması (savings algorithm-SA) ve ekleme yöntemidir (insertion method-IM). Yapılan sayısal çalışmalarda, geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının performansı, alternatif tur kurucu yöntemler üzerinden, GUROBI ile elde edilmiş optimum çözümlerle kıyaslanarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında GSAP'ye ait tanımlama ve model formülasyonu, geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımı, deneysel çalışma ortamı, elde edilen buğular ve sonuçlar yer almaktadır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Gezgin satın alıcı problemi

Gezgin Satın Alıcı Problemi (GSAP) kapsamında, bir satın alıcı, farklı lokasyonlarda konumlanmış marketleri ziyaret ederek, belirli sayıda ürün çeşidine yönelik talebini karşılamayı amaçlamaktadır. Her bir market, ürün çeşitliliği, stok miktarı ve birim fiyat açısından birbirinden farklı özellikler sergileyebilmektedir. Bu bağlamda, satın alıcının bir ürünün tamamına ilişkin talebini tek bir marketten karşılaması zorunlu olmayıp, ihtiyacını birden fazla marketten parçalı alımlar yaparak da giderebilmesi mümkündür.

Öte yandan, satın alıcının tüm marketleri ziyaret etme zorunluluğu bulunmamakta; yalnızca uygun gördüğü ve satın alma kararları doğrultusunda yeterli olan marketleri seçerek işlem yapabilmektedir. Bu durum, satın alıcının hangi marketleri ziyaret edeceği ve bu ziyaretler sırasında izleyeceği rotanın da karar değişkenleri arasında yer almasına neden olmaktadır.

GSAP'nin temel amacı, satın alıcının toplam satın alma ve ulaşım maliyetlerini minimize edecek şekilde hem ziyaret edilecek marketlerin seçimini hem de bu marketler arasındaki rotayı optimize etmektir. Kent içi lojistiği kapsamında GSAP dikkate alındığında gün içerisinde sıklıkla satın alma işlemi gerçekleştirilmektedir. Dolayısı ile etkin bir satın alma ve rota planının kısa süreler içerisinde oluşturulması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda günlük oluşturulacak rota ve satın alma planları için maliyet etkinliğini esas alan karar destek sistemlerinin geliştirilmesi önemli bir durum haline gelmektedir.

Yukarıda detayları verilmiş olan GSAP, Manerba ve ark. [2] tarafından verilmiş olan model formülasyonu temel alınarak, aşağıda verildiği üzere karışık bir tam sayılı programlama modeli olarak formüle edilebilmektedir.

Parametreler

- K Ürünler kümesi
 M Marketler kümesi
 $\{0\}$ Depo noktası
 V Depo ve marketler kümesi
 M_k k ürününün satışının yapıldığı marketler kümesi; $M_k \subseteq M, k \in K$
 d_k k ürününün talep miktarı; $k \in K$
 q_{ik} i marketinde bulunan k ürünü miktarı; $k \in K, i \in M_k$
 p_{ik} i marketinde bulunan k ürünü satış fiyatı; $k \in K, i \in M_k$
 c_{ij} i noktasından j noktasına olan ulaşım maliyeti; $i, j \in V, i \neq j$

Karar Değişkenleri

- x_{ij} satın alıcı i noktasından j noktasına giderse 1, aksi halde 0 değerini alan ikili değişken; $i, j \in V, i \neq j$
 y_i i marketine gidilirse 1, aksi halde 0 değerini alan ikili değişken; $i \in M$
 z_{ik} i marketine gidilerek satın alınan k ürünü miktarı; $k \in K, i \in M_k$
 u_i alt tur engelleme kısıtlarında kullanılan etiket değişkeni; $i \in V$

Model

$$\text{Min} \sum_{\substack{i,j \in V \\ i \neq j}} c_{ij}x_{ij} + \sum_{i \in M_k} \sum_{k \in K} p_{ik}z_{ik} \quad (1)$$

S.t.

$$\sum_{i \in M_k} z_{ik} = d_k \quad k \in K \quad (2)$$

$$z_{ik} \leq q_{ik}y_i \quad k \in K, \quad i \in M_k \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} x_{ij} = y_i \quad i \in M \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} x_{ij} = y_j \quad j \in M \quad (5)$$

$$u_j - u_i \geq 1 - |V|(1 - x_{ij}) \quad i \in M, \quad i \in V \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i, j \in V, \quad i \neq j \quad (7)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad i \in M \quad (8)$$

$$u_i \geq 0 \quad i \in V \quad (9)$$

$$z_{ik} \quad k \in K, \quad i \in M_k \quad (10)$$

Yukarıda verilmiş olan matematiksel modelde (1) no.lu denklem satın alıcının toplam maliyetini minimize edecek amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. (2) no.lu kısıtlar ürün taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. (3) no.lu kısıtlar market kapasitelerini tanımlamaktadır. Bu kısıtlar kapsamında bir marketten satın alınan ürün miktarı ilgili markette bulunan ürün miktarını aşamaz. (4) ve (5) no.lu kısıtlar gezgin satın alıcının rotasının oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlara göre bir market ziyaret edilecek ise bu markete başka bir noktadan gelinmesini ve bu marketten başka bir noktaya gidilmesini

sağlar. (6) no.lu kısıtlar, gezgin satın alıcının rotasında alt tur oluşmasını engelleyen Miller-Tucker-Zemlin [28] denklemleridir. (7)-(10) no.lu ifadeler ise modelde kullanılan karar değişkenlerini tanımlamaktadır.

2.2. Geliştirilen çözüm yaklaşımı

GSAP için geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımı Şekil 1’de gösterildiği üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada marketler TOPSIS yöntemi ile farklı kriterler üzerinden değerlendirilerek sıralanmaktadır. İkinci aşamada ise marketlerin önem sırasına göre market seçimi ve satın alma planlaması yapılmaktadır. Son aşamada ise seçilen marketlere göre rota planlaması NNA, SA ve IM ile ayrı ayrı hesaplanmakta ve elde edilen sonuçlar kıyaslanarak en iyi rota planı seçilmektedir. İlerleyen alt bölümlerde aşamalara ait detaylı bilgiler yer almaktadır.



Şekil 1. Geliştirilen çözüm yaklaşımına ait aşamalar.

2.2.1. TOPSIS yöntemi

İlk olarak Hwang ve Yoon [29] tarafından öne sürülmüş olan TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi belirli alternatiflerin belirli kriterler üzerinden sıralanması için yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisidir. TOPSIS yöntemi alternatiflerin, kriterler bazında ideal pozitif ve ideal negatif çözümlere olan uzaklıkları üzerinden bir sıralama yapmaktadır. Bu çalışmada TOPSIS yöntemi için Shih [30] tarafından yapılan çalışmada verilmiş olan yöntem adımları temel alınmıştır. Bu kapsamda TOPSIS’in temel adımları aşağıda verilmiştir.

- Adım 1. Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması
- Adım 2. Ağırlıklı normalize matrisin oluşturulması
- Adım 3. Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi
- Adım 4. Ayrım ölçümlerinin oluşturulması
- Adım 5. Pozitif ideal çözüme benzerliğin hesaplanması
- Adım 6. Tercih sırasının oluşturulması

m adet alternatif ve n adet kriterin bulunduğu bir karar alma sürecinde TOPSIS yöntemi bir karar matrisini $(X_{ij}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n)$ girdi alarak işleme başlamaktadır. Bu çalışma kapsamında TOPSIS yöntemi için alternatifler, market kümesini $(i \in M)$ içermektedir. Marketlerin değerlendirilmesi için ise aşağıda belirtilmiş olan beş ayrı kriter belirlenmiştir.

- Kriter 1. Marketin diğer marketlere olan ortalama uzaklığı (maliyet)
- Kriter 2. Marketin kendisine en yakın markete olan uzaklığı (maliyet)
- Kriter 3. Markette bulunan ürün çeşidi sayısı (fayda)
- Kriter 4. Markette bulunan ürünlerin ortalama satış fiyatı (maliyet)
- Kriter 5. Markette bulunan ürünlerin talep miktarlarını karşılama seviyesi (fayda)

Yukarıda belirtilmiş olan kriterlerin bir kısmı problemde minimize edilmek maliyetlere yönelik kriterler olmakla birlikte bir kısmı satın alma işlemi için fayda sağlayabilecek kriterlerdir. Belirlenen kriterler üzerinden GSAP için karar matrisi problem verisi üzerinden oluşturulabilmektedir. Karar matrisi oluşturulduktan sonra yöntemin ilk adımında normalize karar matrisi Denklem (11) kullanılarak elde edilmektedir.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

Normalleştirilmiş karar matrisi hesaplandıktan sonra kriterlerin ağırlıkları w_j ($j = 1, \dots, n$) dikkate alınarak Denklem (12) ile ağırlıklı normalleştirilmiş puanlar v_{ij} ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) belirlenir. Burada ağırlıkların toplamının bir ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$) olması gerekir. Yapılan bu çalışmada ağırlıklar eşit olarak kabul edilmiştir.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

Yöntemin bir sonraki adımında her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözümler (v_j^+ , v_j^-) belirlenmektedir. Kriterin bir fayda ile ilişkili olması durumunda pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri sırasıyla Denklem (13) ve (14) ile elde edilmektedir. Aksi halde kriterin bir maliyet ile ilişkili olması durumunda pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri sırasıyla Denklem (15) ve (16) ile hesaplanmaktadır.

$$v_j^+ = \max\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$v_j^- = \min\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$v_j^+ = \min\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$v_j^- = \max\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (16)$$

Yöntemin sonraki adımında her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları (s_i^+ , s_i^-) Denklem (17) ve (18) kullanılarak hesaplanmakta ve alternatifler için ayırım ölçümleri belirlenmektedir.

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^+ - v_{ij})^2} \quad i = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^- - v_{ij})^2} \quad i = 1, \dots, m \quad (18)$$

TOPSIS yönteminin son adımında Denklem (19) kullanılarak her bir alternatifin ideal çözüme olan c_i^+ göreceli yakınlığı belirlenmektedir. Yöntem, alternatiflerin seçime yönelik yakınlık değerinin azalan sırasına göre sıralanmasıyla sona erer. Elde edilen sonuçlar üzerinden çözüm yönteminin bir sonraki adımı olan deneysel tasarım çalışmasında dikkate alınacak parametre seviyeleri belirlenmiştir.

$$c_i^+ = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^+} \quad i = 1, \dots, m \quad (19)$$

2.2.2. Satın alma planlaması

Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının ikinci aşamasında TOPSIS yöntemi ile elde edilen market sıralamasına göre ürün talepleri iteratif bir şekilde karşılanmaktadır. Bu kapsamda önem derecesi en yüksek marketten başlanarak sırayla marketler çözüme eklenmektedir. Her bir market eklenmesinde ilgili marketten ürün talepleri mümkün olduğunca karşılanmaktadır. Bu işlem sonunda karşılanmayan bir ürün talebi kalması durumunda bir sonraki market çözüme eklenerek aynı işlem tekrarlanmaktadır. Bu süreçte ilişkin işlem adımları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

- Adım 1. TOPSIS yönteminin sonucuna göre marketleri ($i \in M$) önem derecesine (c_i^+) göre sırala.
- Adım 2. Sıralanmış listenin en başında yer alan i marketini çözüme ekle.
- Adım 3. i marketinde yer alan ürünler miktarı ve talebe göre mümkün olan tüm satın alma işlemlerini yap.
- Adım 4. Satın alma işlemlerine göre kalan ürün talep miktarlarını güncelle ve i marketini M listesinden sil.
- Adım 5. Karşılanmayan bir ürün talebi var ise Adım 2'ye dön, aksi halde dur.

Yukarıda belirtilmiş olan işlem adımları sonrasında satın alma maliyetleri düşürebilmek için çözümde yer alan her bir (i, j) market çifti için satın alınan ürünler karşılaştırılmakta ve bir $(k \in K)$ ürünü daha düşük maliyetli satın alma seçeneği var ise satın alma planlaması güncellenmektedir.

2.2.3. Rota planlaması

Çözüm yaklaşımının son aşamasında satın alma planlamasına göre seçilmiş olan marketler ($M^* \subseteq M$) için rota planlaması yapılmaktadır. Rota planlaması için üç farklı tur kurucu yöntem (NNA, SA, IM) dikkate alınarak en düşük ulaşım maliyetine sahip çözüm seçilmektedir.

NNA rotaya ilk olarak depo noktasından veya rassal olarak seçilen bir nokta ile başlar. Sonrasında rotanın sonunda bulunan noktaya, ziyaret edilmemiş noktalar içerisinde en yakın olan noktayı seçip rotanın sonuna ekleyerek işleme devam eder. Bu işlem, tüm noktalar rotaya ekleninceye kadar devam eder.

SA'da ise her bir (i, j) çifti için i ve j noktalarını birleştirme sonucunda elde edilebilecek tasarruf değeri $s_{ij} = c_{0i} + c_{j0} - c_{ij}$ denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen tasarruf değerlerine göre en yüksek tasarrufa sahip (i, j) çifti rotanın başında veya rotanın sonunda ise birleştirilerek tur oluşturulmaktadır.

SA'nın genişletilmiş bir hali olan IM'de her bir i marketi için rotanın her bir pozisyonuna eklenmesinin maliyeti hesaplanmaktadır. Hesaplanan maliyetlere göre en düşük ekleme maliyetine sahip i marketi rotada belirlenmiş olan pozisyona eklenmektedir.

Yukarıda belirtilmiş olan her bir yöntem çözüm yönteminin ikinci aşamasında seçilmiş olan marketlere uygulanarak alternatif rotalar oluşturulmaktadır. Elde edilen üç alternatif rota içerisinde en düşük maliyetli olan rota nihai rota olarak belirlenmektedir.

2.3. Deney ortamı

Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının etkinliğini test edebilmek için GUROBI çözücüsü ile optimum sonuçları elde edilebilecek farklı büyüklükte GSAP problemleri rassal olarak üretilmiştir. Bu kapsamda market sayısı ve ürün çeşidi sayısı için 10, 20 ve 30 büyüklükleri belirlenmiştir. Her bir $(|V|, |K|)$ değeri için 10 farklı rassal problem üretilmiştir. Sayısal çalışmalar için toplamda 90 adet örnek problem oluşturulmuştur. Oluşturulan problemlerde noktalar arası mesafeler, $(0,50)$ aralığında düzgün dağılıma sahip rassal değerler ile belirlenmiştir. Ürün bilgilerinin oluşturulmasında ise üç farklı ürün çeşidi dikkate alınmıştır: yüksek talebi olan düşük fiyatlı ürünler, orta miktarda ve orta fiyatta olan ürünler ve düşük talebe sahip yüksek fiyatlı ürünler. Problem içerisinde her bir k ürünü, bu üç seçenekten birisi olacak şekilde rassal olarak belirlenmiştir. Belirlenen ürün çeşidine göre ürünün talebi; yüksek talepli ürünler için $(20,50)$, orta talepli ürünler için $(5,20)$ ve düşük talepli ürünler için $(1,5)$ aralığında rassal olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde ürünlerin marketlerde satış değerleri de sırasıyla $(0.5,10)$, $(10,50)$ ve $(50,250)$ aralıkları üzerinden hesaplanmıştır. Ürünlerin marketlerde bulunma olasılığı ise ürün çeşidine göre sırasıyla $(0.7,0.9)$, $(0.4,0.6)$ ve $(0.1,0.3)$ olarak dikkate alınmıştır. Üretilmiş olan veri setine http://ikucukoglu.home.uludag.edu.tr/Problem_Sets/GSAP.zip linki üzerinden erişim sağlanabilmektedir.

Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımı Visual Studio derleyicisi üzerinde VB.NET kodlama dili ile oluşturulmuş olup sayısal çalışmalar Intel® Core i7-8665U CPU @1.90GHz, 16 GB bellek özelliğine sahip mobil iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

2.4. Yöntem uygulaması

Yukarıda detayları açıklanmış olan çözüm yaklaşımı veri seti içerisinde $|V| = 10$ ve $|K| = 10$ büyüklüğünde ilk üretilen problem üzerinde uygulanarak yöntemin geçerliliği test edilmiştir. Karar matrisinin oluşturulabilmesi için her bir i marketi için kriterler sırasıyla Denklem (20)-(24) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_{i1} = \frac{\sum_{j \in M} c_{ij}}{i \neq j} \quad (20)$$

$$X_{i2} = \min\{c_{ij}, j \in M \quad i \neq j\} \quad (21)$$

$$X_{i3} = \sum_{k \in K} \min\{q_{ik}, 1\} \quad (23)$$

$$X_{i4} = \frac{\sum_{k \in K} (\min\{q_{ik}, 1\} \times q_{ik})}{\sum_{k \in K} \min\{q_{ik}, 1\}} \quad (23)$$

$$X_{i5} = \frac{\sum_{k \in K} (\min\{q_{ik}, 1\} \times \min\{1, q_{ik}/d_k\})}{\sum_{k \in K} \min\{q_{ik}, 1\}} \quad (24)$$

Tablo 1’de örnek problem için elde edilmiş karar matrisi (X_{ij}) verilmiştir. Karar matrisinde belirtilmiş olan kriterlerin ağırlıkları birbirine eşit ($w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0.2$) kabul edilmiştir. Tablo 1 üzerinden Denklem (11) ve (12) uygulanarak normalize edilmiş ağırlık karar matrisi (v_{ij}) oluşturulmuştur (Tablo 2).

Tablo 1. Örnek problem için oluşturulmuş karar matrisi.

| Lokasyon | Kriter 1 | Kriter 2 | Kriter 3 | Kriter 4 | Kriter 5 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Depo | - | - | - | - | - |
| Market 1 | 32.22 | 3.22 | 6 | 22.17 | 0.62 |
| Market 2 | 25.77 | 3.62 | 7 | 28.62 | 0.64 |
| Market 3 | 18.76 | 3.22 | 4 | 23.96 | 0.48 |
| Market 4 | 35.10 | 15.19 | 5 | 20.30 | 0.43 |
| Market 5 | 27.15 | 12.12 | 4 | 11.69 | 0.53 |
| Market 6 | 30.42 | 6.21 | 5 | 22.26 | 0.55 |
| Market 7 | 24.48 | 1.69 | 5 | 13.69 | 0.53 |
| Market 8 | 30.20 | 3.62 | 8 | 25.94 | 0.62 |
| Market 9 | 29.87 | 1.77 | 5 | 37.38 | 0.64 |

Tablo 2. Örnek problem için hesaplanan ağırlık normalize edilmiş karar matrisi.

| Lokasyon | Kriter 1 | Kriter 2 | Kriter 3 | Kriter 4 | Kriter 5 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Depo | - | - | - | - | - |
| Market 1 | 0.0751 | 0.0297 | 0.0716 | 0.0616 | 0.0735 |
| Market 2 | 0.0601 | 0.0334 | 0.0835 | 0.0795 | 0.0756 |
| Market 3 | 0.0438 | 0.0297 | 0.0477 | 0.0665 | 0.0566 |
| Market 4 | 0.0819 | 0.1403 | 0.0597 | 0.0564 | 0.0511 |
| Market 5 | 0.0633 | 0.1119 | 0.0477 | 0.0325 | 0.0622 |
| Market 6 | 0.0710 | 0.0573 | 0.0597 | 0.0618 | 0.0651 |
| Market 7 | 0.0571 | 0.0156 | 0.0597 | 0.0380 | 0.0630 |
| Market 8 | 0.0704 | 0.0334 | 0.0954 | 0.0720 | 0.0727 |
| Market 9 | 0.0697 | 0.0163 | 0.0597 | 0.1038 | 0.0755 |

Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi üzerinden Denklem (13)-(16) uygulanarak pozitif ne negatif ideal çözüme olan uzaklıklar hesaplanmıştır. Tablo 3’te hesaplanmış olan pozitif ne negatif ideal çözümler gösterilmektedir. Son olarak Tablo 4’te alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözüme uzaklıkları, ideal çözüme göreceli uzaklıkları ve alternatiflerin TOPSIS skorlarına göre sıralanması verilmektedir.

Tablo 3. Toplam maliyetler üzerinden alternatif yöntemlerin karşılaştırılması.

| Lokasyon | Kriter 1 | Kriter 2 | Kriter 3 | Kriter 4 | Kriter 5 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pozitif İdeal Çözüm (v_j^+) | 0.0438 | 0.0156 | 0.0954 | 0.0325 | 0.0756 |
| Negatif İdeal Çözüm (v_j^-) | 0.0819 | 0.1403 | 0.0477 | 0.1038 | 0.0511 |

Tablo 4. TOPSIS yöntemi sonucunda alternatiflerin skorları ve sıralanması.

| Lokasyon | s_i^+ | s_i^- | c_i^+ | Sıralama |
|----------|---------|---------|---------|----------|
| Depo | - | - | - | - |
| Market 1 | 0.0511 | 0.1440 | 0.7382 | 5 |
| Market 2 | 0.0542 | 0.1608 | 0.7479 | 4 |
| Market 3 | 0.0633 | 0.1696 | 0.7283 | 6 |
| Market 4 | 0.1394 | 0.2159 | 0.6075 | 9 |
| Market 5 | 0.1101 | 0.2725 | 0.7122 | 7 |
| Market 6 | 0.0688 | 0.2306 | 0.7702 | 3 |
| Market 7 | 0.0406 | 0.2423 | 0.8564 | 1 |
| Market 8 | 0.0511 | 0.2020 | 0.7982 | 2 |
| Market 9 | 0.0839 | 0.2001 | 0.7045 | 8 |

TOPSIS metodu sonucunda elde edilen market sıralamasına göre ürün alımları, marketlerin sırayla çözüme eklenmesiyle sağlanmaktadır. Buna göre ürün talepleri sağlanana kadar çözüme eklenen marketler sırasıyla “M7, M8, M6, M2” olmuştur. Seçilen marketler üzerinden elde edilen satın alma maliyet 1990.02 birim olarak hesaplanmıştır. Yapılmış olan market seçimlerinin ardından NNA, SA ve IM kullanılarak üç ayrı rota planı oluşturulmuştur. Tablo 5’te her bir tur kurucu metot ile elde edilen rotalar ve maliyetler verilmiştir. Elde edilen toplam maliyetler dikkate alındığında ilgili örnek problem için her bir tur kurucu yöntem ile aynı rota uzunluğu elde edilmiştir. İlgili problem için GUROBI çözücüsü ile elde edilen optimum sonucunda ise toplam maliyet 2021.39 birim olarak tespit edilmiştir. Önerilen yöntemden elde edilen toplam maliyet ile kıyaslandığında önerilen yöntemin optimum sonuçtan %1.66 bir fark ile çözüm elde edildiği görülmüştür.

Tablo 5. Örnek problem için NNA, SA ve IM ile elde edilen rota planları.

| Metot | Rota | Satın Alma Maliyeti | Ulaşım Maliyeti | Toplam Maliyet |
|-------|------------------------|---------------------|-----------------|----------------|
| NNA | Depo-M7-M6-M8-M2 -Depo | | 65.82 | 2055.04 |
| SA | Depo-M7-M6-M8-M2 -Depo | 1990.02 | 65.82 | 2055.04 |
| IM | Depo-M7-M6-M8-M2 -Depo | | 65.82 | 2055.04 |

3. Bulgular ve tartışma

Yapılan sayısal çalışmalarda ilk olarak çözüm yönteminin ilk iki aşaması olan satın alma planlamasının etkinliği analiz edilmiştir. Bu kapsamda önerilen çözüm yöntemi ile problemlerde elde edilen satın alma maliyetleri ve GUROBI çözücüsü ile GSAP için elde edilen optimum sonuçlarda oluşan satın alma maliyetleri karşılaştırılmıştır. Tablo 6’da elde edilen sonuçlar ve önerilen çözüm yöntemiyle GUROBI çözücüsünün elde ettiği çözüme ait satın alma maliyetleri arasındaki yüzdelik fark (%Fark) gösterilmektedir.

%Fark değerleri incelendiğinde önerilen çözüm yaklaşımı ile elde edilen satın alma maliyetlerinin optimum sonuçlarda yer alan satın alma maliyetlerine %1'den daha düşük farklar ile oldukça yakın üretebildiği tespit edilmiştir. Diğer yandan negatif olan %Fark değeri; GSAP'nin optimum sonucunda, satın alma maliyetlerinde ufak artışlara izin vererek toplam maliyetlerde daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir. Tablo 6'da yansıtılan GUROBI sonucu, optimum sonuca göre toplam maliyet içerisinde oluşan satın alma maliyetini göstermektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması sadece satın alma maliyetlerine odaklandığı için GUROBI'nin bulduğu optimum sonuçta yer alan satın alma maliyetlerine göre %-0.01 gibi negatif bir değer oluşması problem açısından olası bir durumdur.

Tablo 6. Önerilen yöntem ve GUROBI çözücü ile elde edilen satın alma maliyetleri.

| V | K | Satın Alma Maliyetleri | | |
|----|----|------------------------|-----------------|-------|
| | | GUROBI | Önerilen Yöntem | %Fark |
| 10 | 10 | 2701.54 | 2702.67 | 0.05 |
| 10 | 20 | 6999.40 | 7014.05 | 0.19 |
| 10 | 30 | 9630.31 | 9629.26 | -0.01 |
| 20 | 10 | 3429.32 | 3434.90 | 0.16 |
| 20 | 20 | 6225.11 | 6233.86 | 0.11 |
| 20 | 30 | 10102.48 | 10115.74 | 0.13 |
| 30 | 10 | 2745.18 | 2753.62 | 0.32 |
| 30 | 20 | 6016.14 | 6052.06 | 0.56 |
| 30 | 30 | 9906.36 | 9943.49 | 0.36 |

Sayısal çalışmalarda yapılan diğer bir analiz ise çözüm yöntemi ile elde edilen toplam maliyetlerin optimum sonuçlar ile arasındaki farkı olmuştur. Tablo 7'de her bir alternatif tur kurucu yöntem ile elde edilen sonuçlar ve son iki sütunda bu alternatifler arasında yer alan en iyi sonuç gösterilmektedir. Koyu karakterler ile belirtilmiş olan sonuçlar en iyi sonuca sahip çözümü ifade etmektedir. Elde edilen en iyi sonuçlar dikkate alındığında geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının %5'ten daha düşük farklar ile optimum sonuca yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Diğer yandan üç alternatif tur kurucu yöntem birbirleri ile karşılaştırıldığında IM'nin diğer iki tur kurucu yöntemle göre daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Bu kapsamda yapılan diğer bir analiz ise 90 problem içerisinde algoritmaların diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç bularak başarılı olduğu durum sayısıdır. Tablo 8'de elde edilen sonuçlar problem büyüklüklerine göre gösterilmekte olup son satırda toplam başarı sayısı verilmektedir. Tablo 8'den de açık bir şekilde görüleceği üzere IM, 47 problem için diğer iki algoritmadan daha iyi sonuç bularak üstünlük sağlamıştır. IM'den sonra ise NNA 24 problem için SA ise 13 problem için diğer iki algoritmaya üstünlük sağlamıştır. Beş problem için ise en az iki algoritmanın sonucu birbirine eşit çıktığından bir üstünlük durumu oluşmamıştır.

Tablo 7. Toplam maliyetler üzerinden alternatif yöntemlerin karşılaştırılması.

| V | K | Toplam Maliyet | | | | | | | | |
|----|----|----------------|----------|-------------|----------|-------|----------|-------------|--------------|-------|
| | | GUROBI | NNA | %Fark | SA | %Fark | IM | %Fark | En İyi Sonuç | %Fark |
| 10 | 10 | 2765.56 | 2830.68 | 2.41 | 2822.65 | 2.19 | 2814.91 | 1.81 | 2809.25 | 1.60 |
| 10 | 20 | 7082.01 | 7136.22 | 0.79 | 7126.04 | 0.61 | 7124.22 | 0.62 | 7112.34 | 0.42 |
| 10 | 30 | 9724.92 | 9765.68 | 0.43 | 9753.61 | 0.31 | 9746.67 | 0.22 | 9738.85 | 0.14 |
| 20 | 10 | 3485.55 | 3579.68 | 2.74 | 3590.08 | 3.02 | 3580.35 | 2.75 | 3567.88 | 2.39 |
| 20 | 20 | 6299.25 | 6387.61 | 1.45 | 6407.43 | 1.74 | 6372.29 | 1.18 | 6371.31 | 1.17 |
| 20 | 30 | 10180.41 | 10249.94 | 0.69 | 10279.61 | 0.98 | 10245.39 | 0.65 | 10239.46 | 0.59 |

| | | | | | | | | | | |
|----|----|---------|----------|-------------|----------|------|----------|-------------|----------|------|
| 30 | 10 | 2786.92 | 2915.23 | 4.89 | 2943.50 | 5.90 | 2920.55 | 5.07 | 2906.29 | 4.56 |
| 30 | 20 | 6083.42 | 6211.05 | 2.12 | 6241.34 | 2.61 | 6203.88 | 2.00 | 6191.68 | 1.79 |
| 30 | 30 | 9982.48 | 10100.10 | 1.16 | 10131.46 | 1.48 | 10092.82 | 1.09 | 10088.74 | 1.05 |

Tablo 8. 90 problem için elde edilen başarılı sonuç sayıları.

| V | K | Elde Edilen Başarı Sayısı | | |
|--------|----|---------------------------|----|----|
| | | NNA | SA | İM |
| 10 | 10 | 1 | 3 | 4 |
| 10 | 20 | 1 | 3 | 5 |
| 10 | 30 | 0 | 4 | 4 |
| 20 | 10 | 5 | 2 | 3 |
| 20 | 20 | 2 | 0 | 7 |
| 20 | 30 | 4 | 0 | 6 |
| 30 | 10 | 4 | 0 | 6 |
| 30 | 20 | 4 | 1 | 5 |
| 30 | 30 | 3 | 0 | 7 |
| Toplam | | 24 | 13 | 47 |

4. Sonuç ve öneriler

Yapılan bu çalışmada, günümüzde artan satın alma işlemleri ve neticesinde yoğunlaşan kent içi lojistik operasyonları dikkate alınarak gezgin satın alıcı problemi için çok kriterli karar verme yöntemlerine dayalı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımında ürünlerin taleplerini karşılamak üzere market seçimleri TOPSIS yöntemine dayalı yapılmaktadır. Belirli kriterlere göre değerlendirilen marketler önem derecelerine göre sıralanarak satın alma planlaması bu sıraya göre gerçekleştirilmektedir. Satın alma planlaması sonrasında seçilen marketlerin ziyaret sırası üç farklı tur kurucu yöntem üzerinden belirlenerek en iyi rota toplam ulaşım maliyeti üzerinden seçilmektedir. Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının performansı, farklı büyüklükte problemler üzerinden optimum sonuçlarla kıyaslanarak belirlenmiştir. Sayısal sonuçlar sonunda geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının %5'ten daha düşük farklar ile optimum sonuca yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Ek olarak alternatif tur kurucu yöntemler arasından ekleme yönteminin diğer iki yöntemle göre daha üstün olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışma üzerinden ileriye yönelik farklı yönlerde genişletilebilir. Öncelikle TOPSIS yöntemi ile yapılan market seçimi, günümüzde kullanım alanı oldukça yaygınlaşan makine öğrenmesi yöntemleri ile planlanabilir. Bu durumda optimum sonuçları bilinen problemler üzerinden denetimli bir öğrenme ile market seçimleri gerçekleştirilebilir. Ek olarak rota planlamasının yapıldığı ikinci aşamada tur kurucu yöntemler yerine daha ileri seviyede yöntemler kullanılarak rota planlaması daha etkin hale getirilebilir. Diğer yandan gerçek hayat uygulamalarında deterministik bir modeli etkin bir şekilde kullanmak verinin mevcudiyeti veya sistemin dinamikliği açısından her zaman mümkün olmayabilir. Dolayısı ile bu çalışmada dikkate alınan problem, stokastik veya dinamik bir problem olarak genişletilerek çözüm yaklaşımı bu problemlere entegre edilebilir. Son olarak GSAP, kent içi lojistiğine ait pratik uygulamalarda yer alan farklı koşullar altında yeni kısıtlar ile modellenebilir.

Kaynaklar

- [1] Ramesh, T., Traveling purchaser problem, *Opsearch*, **18**, 78-91, (1981).

- [2] Manerba, D., Mansini, R. ve Riera-Ledesma, J., The traveling purchaser problem and its variants, **European Journal of Operational Research**, **259**, 1-18, (2017).
- [3] Bernardino, R. ve Paias, A., Metaheuristics based on decision hierarchies for the traveling purchaser problem, **International Transactions in Operational Research**, **25**, 1269-1295, (2018). Doi: 10.1111/itor.12330
- [4] Choi, M.J. ve Lee, S.H., The multiple traveling purchaser problem for maximizing system's reliability with budget constraints, **Expert Systems with Applications**, **38**, 9848-9853, (2011). Doi: 10.1016/j.eswa.2011.02.018
- [5] Kang, S. ve Ouyang, Y., The traveling purchaser problem with stochastic prices: Exact and approximate algorithms, **European Journal of Operational Research**, **209**, 265-272, (2011). Doi: 10.1016/j.ejor.2010.09.012
- [6] Voß, S., Dynamic tabu search strategies for the traveling purchaser problem, **Annals of Operations Research**, **63**, 253-275, (1996). Doi: 10.1007/BF02125457
- [7] Gouveia, L., Paias, A. ve Voß, S., Models for a traveling purchaser problem with additional side-constraints, **Computers & Operations Research**, **38**, 550-558, (2011). Doi: 10.1016/j.cor.2010.07.016
- [8] Riera-Ledesma, J. ve Salazar-González, J.J., A column generation approach for a school bus routing problem with resource constraints, **Computers & Operations Research**, **40**, 2, 566-583, (2013). Doi: 10.1016/j.cor.2012.08.011
- [9] Roy, A., Maity, S. ve Moon, I., Multi-vehicle clustered traveling purchaser problem using a variable-length genetic algorithm, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, **123**, 106351, (2023). Doi: 10.1080/01966324.2020.1805060
- [10] Batista-Galván, M., Riera-Ledesma, J. ve Salazar-González, J.J., The traveling purchaser problem, with multiple stacks and deliveries: A branch-and-cut approach, **Computers & Operations Research**, **40**, 2103-2115, (2013). Doi: 10.1016/j.cor.2013.02.007
- [11] Manerba, D. ve Mansini, R., A branch-and-cut algorithm for the multi-vehicle traveling purchaser problem with pairwise incompatibility constraints, **Networks**, **65**, 139-154, (2015). Doi: 10.1002/net.21588
- [12] Bianchessi, N., Mansini, R. ve Speranza, M.G., The distance constrained multiple vehicle traveling purchaser problem, **European Journal of Operational Research**, **235**, 73-87, (2014). Doi: /10.1016/j.ejor.2013.10.018
- [13] Mansini, R. ve Tocchella, B., The traveling purchaser problem with budget constraint, **Computers & Operations Research**, **36**, 2263-2274, (2009). Doi: 10.1016/j.ejor.2016.12.017
- [14] Kucukoglu, I., The traveling purchaser problem with fast service option, **Computers & Operations Research**, **141**, 105700, (2022). Doi: 10.1016/j.cor.2022.105700
- [15] Cheaitou, A., Hamdan, S., Larbi, R. ve Alsyouf, I., Sustainable traveling purchaser problem with speed optimization, **International Journal of Sustainable Transportation**, 1-20, (2020). Doi: 10.1080/15568318.2020.1774825
- [16] Golden, B., Levy, L. ve Dahl, R., Two generalizations of the traveling salesman problem, **Omega**, **9**, 439-441, (1981). Doi:10.1016/0305-0483(81)90087-6
- [17] Ong, H.L., Approximate algorithms for the travelling purchaser problem, **Operations Research Letters**, **1**, 201-205, (1982). Doi: 10.1016/0167-6377(82)90041-4

- [18] Pearn, W.L., On the traveling purchaser problem, Department of Industrial Engineering and Management, **National Chiao Tung University**, (1991).
- [19] Goldberg, M.C., Bagi, L.B. ve Goldberg, E.F.G., Transgenetic algorithm for the traveling purchaser problem, **European Journal of Operational Research**, **199**, 36-45, (2009). Doi: 10.1016/j.ejor.2008.10.027
- [20] Kucukoglu, I., Cattrysse, D. ve Vansteenwegen, P., Simulated annealing for the traveling purchaser problem in cold chain logistics. **Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Intelligent Manufacturing and Service System Informatics**, Springer, (2023). Doi: 10.1007/978-981-99-6062-0_24
- [21] Ochi, L., Silva, M. ve Drummond, L., Metaheuristics based on GRASP and VNS for solving the traveling purchaser problem. Proc. of the IV Metaheuristic International Conference (MIC'2001), July 16-20 2001 Porto, Portugal, 489-494, (2001).
- [22] Nasution, S.M., Septiawan, R.R. ve Azmi F., Tourism itinerary recommendation using vehicle routing problem time windows based on shortest path method and analytics hierarchy process, **Preprint**, (2024). doi:10.20944/preprints202312.0892.v1
- [23] Bakioğlu, G., Yeşil araç rotalama problemlerinin entegre pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri ile analizi, **Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology**, **12**, 4, 864-881, (2024). Doi:10.29109/gujsc.1480578
- [24] Petrovic, S., Islam, K.J. ve Trautrim, A., NSGA-II and TOPSIS for a multi-objective vehicle routing problem with ecological considerations. In: Optimization Essentials, **International Series in Operations Research & Management Science**, **353**, 721-750, (2024). Doi: 10.1007/978-981-99-5491-9_24
- [25] Maneengam, A., Multi-objective optimization of the multimodal routing problem using the adaptive ϵ -constraint method and modified TOPSIS with the D-CRITIC method, *Sustainability*, **15**, 15, 1-22, (2023). Doi: 10.3390/su151512066
- [26] Abidin, S.Z., Jaini, N.I. ve Daud, H., Decision-making support in vehicle routing problems: A review of recent literature, **Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology**, **44**, 2, 124-134, (2025). Doi: 10.37934/araset.44.2.124134
- [27] Tian, G., Lu, W., Zhang, X., Zhan, M., Dulebentes, M.A., Aleksandrov, A., Fathollahi-Fard, A.M. ve Ivanov, M., A survey of multi-criteria decision-making techniques for green logistics and low-carbon transportation systems, **Environmental Science and Pollution Research**, **30**, 57279-57301, (2023). Doi: 10.1007/s11356-023-26577-2
- [28] Miller, C.E., Tucker, A.W. ve Zemlin, R.A., Integer programming formulation of traveling salesman problems, **Journal of the ACM**, **7**, 4, 326-329, (1960). Doi: 10.1145/321043.32104
- [29] Hwang, C.L. ve Yoon, K., Methods for multiple attribute decision making, **Multiple Attribute Decision Making**, 58-191, (1981). Doi: 10.1007/978-3-642-48318-9_3
- [30] Shih, H.S., TOPSIS Basics. In: TOPSSIS and its extensions: A distance-based MCDM approach, **Studies in Systems, Decision and Control**, **447**, 17-31, (2022). Doi:10.1007/978-3-031-09577-1_2