



Araç Rotalama Probleminin Çözümü İçin Çok Amaçlı Genel Değişken Komşuluk Arama Metasezgisel Yaklaşımı

Hacer Yumurtacı Aydoğmuş^{1*}, Yücel Özcan²

^{1*} Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye. (ORCID: 0000-0002-2307-0840), hacer.aydogmus@alanya.edu.tr

² Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0264-6062), yclzcn07@gmail.com

(2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, March 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1082592)

ATIF/REFERENCE: Yumurtacı Aydoğmuş, H. & Özcan, Y. (2022). Araç Rotalama Probleminin Çözümü İçin Çok Amaçlı Genel Değişken Komşuluk Arama Metasezgisel Yaklaşımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 428-432.

Öz

İşletmeler açısından rotalama problemleri büyük önem taşıyan ve çözümünü için çeşitli yöntemler geliştirilmeye çalışılan problemlerden birisidir. Günümüzde sera gazı salınımının düşürülmesine yönelik sürdürülebilirlik çerçevesinde çeşitli önlemler alınmaktadır. Araç rotalama problemleri de sera gazı salınımının yaklaşık yüzde yirmilik kısmını oluşturan ulaştırma sektörü içinde karşılaşılabilen problemlerdendir. Bu açıdan araç rotalama problemlerinde genellikle minimum mesafe, minimum araç sayısı, minimum karbon emisyonu gibi amaç fonksiyonları kullanılmaktadır. 1997 yılında ilk olarak Mladenovic ve Hansen tarafından geliştirilen ve sistematik olarak komşuluk değişimleri fikrini kullanan Değişken Komşuluk Arama (DKA) metasezgiseli farklı çeşitlere sahiptir. Bu çeşitlerden birisi de Genel Değişken Komşuluk Arama (GDKA) yapısıdır. Bu çalışmada çok amaçlı araç rotalama problemine uygulamak üzere geliştirilen ve değişken komşuluk arama metasezgisel yaklaşımı temelli Çok Amaçlı Genel Değişken Komşuluk Arama (ÇAGDKA) yönteminin gerçek hayat probleminde uygulanarak mevcut rotalar üzerinde iyileştirme yapılması amaçlanmıştır. ÇAGDKA (Yumurtacı Aydoğmuş, 2011) yaklaşımı, Geiger'in 2004 yılında ilk defa ortaya attığı çok amaçlı değişken komşuluk arama (ÇADKA) yönteminden yola çıkarak geliştirilmiştir. Çalışmada ÇAGDKA yaklaşımının mevcut rotadan daha iyi sonuç verdiği ve farklı iki senaryo ile elde edilen sonuçlarla da karşılaştırıldığında da daha iyi sonuçlar sunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çok Amaçlı Genel Değişken Komşuluk Arama, Metasezgisel, Araç Rotalama.

Multi Objective General Variable Neighborhood Search Metaheuristic for Solving Vehicle Routing Problem

Abstract

Routing problems are one of the problem types that are of great importance for businesses and various methods are tried to be developed for their solution. Today, different measures are taken within the framework of sustainability to reduce greenhouse gas emissions. Vehicle routing problems are also one of the problems that can be encountered in the transportation sector, which accounts for about twenty percent of greenhouse gas emissions. In this respect, objective functions such as minimum distance, minimum number of vehicles, minimum carbon emission are generally used in vehicle routing problems. Variable Neighborhood Search (VNS), which was first developed by Mladenovic and Hansen in 1997 and systematically uses the idea of neighborhood changes, has different varieties of metaheuristics. One of these types is the General Variable Neighborhood Search (GVNS) structure. In this study, it is aimed to improve the existing routes by applying the variable neighborhood search metaheuristic approach-based Multi-Objective General Variable Neighborhood Search (MOGVNS) method, which was developed to apply to the multi-objective vehicle routing problem, in a real life problem. The MOGVNS (Yumurtacı Aydoğmuş, 2011) approach was developed based on the Multi-Objective Variable Neighborhood Search (MOVNS) method, which was first introduced by Geiger in 2004. In the study, it was seen that the MOGVNS approach gave better results than the current route and provided better results when the results obtained with the two different scenarios were compared.

Keywords: Multi-Objective General Variable Neighborhood Search, Metaheuristic, Vehicle Routing.

* Sorumlu Yazar: hacer.aydogmus@alanya.edu.tr

1. Giriş

Modern firmaların lojistik operasyonlarının özünde malzemelerin minimum maliyetle depolara yönlendirilmesi veya birleştirilmesi sorunu bulunmaktadır ve bu sorunların belirli kısıtlamaları bulunmaktadır [1]. Arazi kullanımı, kaynak tüketimi gibi açılardan ekosistemlere ve insan sağlığına zarar vermesi nedeniyle araç taşımacılığının çevre üzerindeki olumsuz etkisi bilinmektedir. Ayrıca sera gazı emisyonunun, küresel sıcaklıklarda gözlenen artışa sebep olduğu bilinmektedir [2]. 2011 yılında yapılan bir çalışma göstermektedir ki CO₂ emisyonlarının %33'ü ulaştırma sektöründen gelmektedir [3]. Ulaştırma sektöründeki çevresel ve ekonomik yönlendirmeler, araştırmacıların yönlendirme sorunlarının optimizasyonuna olan ilgisini arttırmaktadır [4].

NP-hard problemlerden olan araç rotalama problemleri (ARP) [5], ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında ele alınmasından bu yana geçen 60 yıllık sürede sıklıkla ele alınan bir konu olmuştur. Laporte [6] ARP'nin uygun teslimatı tasarlama problemi olarak tanımlanabildiğini, bir veya birkaç depodan coğrafi açıdan dağınık şehir ve müşterileri kapsadığını belirtmiştir.

ARP, taşıdığı özelliklere göre farklı çeşitlere ayrılmıştır. Aracın tipine göre homojen veya heterojen ARP, talebin yapısına göre sabit veya stokastik talepli ARP, depo sayısına göre çok ve tek depolu, aracın depoya dönme şartının bulunmaması durumu için açık uçlu ARP gibi. Ayrıca, problem sahip olduğu amaç fonksiyonunun bir veya birden fazla olmasına göre de tek amaçlı veya çok amaçlı olmak üzere ikiye ayrılabilir. [7].

Araç rotalama problemleri genellikle maliyet (uzaklık veya finansal) minimizasyonu gibi tek amaca sahip olmaktadır. Çoğu gerçek endüstri problemleri ise sadece maliyet ile sınırlanılmayıp, birden çok amaca sahiptir. Örneğin, sadece maliyet bile göz önüne alınmış olsa, aynı problem için farklı maliyetlerin (zaman ve para gibi) tanımlanması mümkündür. Ayrıca, maliyetin yanı sıra gecikme ve eşitlik gibi kavramlarla da uğraşan amaçlar olabilmektedir. Bu sebeplerden çok amaçlı araç rotalama problemlerine ilgi gösterilmektedir [7].

ARP çözümleri için çok sayıda metasezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bunlar; tavlama benzetimi [8, 9, 10], tabu arama [11, 12], genetik algoritma [13, 14, 15] gibi yöntemleri kapsamaktadır.

Bu çalışmada da 1997 yılında geliştirilen ve ilk olarak p-medyan problemine uygulanan Değişken Komşuluk Arama (DKA) yaklaşımının bir çeşidi olan Genel Değişken Komşuluk Arama (GDKA) yönteminin çok amaçlı araç rotalama problemine uygulanması gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. ÇAGDKA Yaklaşımına Ait Algoritma

Bu çalışma için, Geiger'in 2004 yılında ilk defa ortaya attığı çok amaçlı değişken komşuluk arama (ÇADKA) yönteminin üzerinde çeşitli değişiklikler yapılması ve genel değişken komşuluk arama (GDKA) yaklaşımına uyarlanmasıyla 2011 yılında geliştirilen çok amaçlı genel değişken komşuluk arama (ÇAGDKA) kullanılmıştır.

ÇADKA uygulamasında komşuluklar içerisinde rassal seçim yapılması durumu söz konusu iken, ÇAGDKA yönteminde denemeler sonucu bulunan belli bir sıranın takip edilmesi esastır. GDKA'nın yapısı gereği, söz konusu komşuluk yapılarının uygun sıraları, silkeleme ve yerel arama aşamalarında ayrı ayrı olmak üzere belirlenmiştir. Bu açıdan çalışmada komşuluk yapılarının sırasının belirlenmesine odaklanarak farklı sıralamalarla ve farklı tekrarlamaya sayıları ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

Çalışmada kullanılan ÇAGDKA yaklaşımına ait algoritma Şekil 1'de gösterilmiştir.

Adm 1: Seçilen yöntemin çalıştırılması ile başlangıç çözümü oluşturulur.

Adm 2: Başlangıç çözümünün iki amaç fonksiyonu değeri "pareto" kümesine atılır.

Dış döngü tekrarı:
k=1 olarak alınır.

k ≤ 5 için tekrar adımları:

Adm 3: Silkeleme aşamasının gerçekleştirilmesi için, amaç fonksiyonu değerlerine bakılmadan, geçerli çözüme k komşuluk yapısının uygulanması ile kısıtları sağlayan rassal bir çözüm üretilir.

İç döngü tekrarı (yerel arama):
l=1 olarak alınır.

l ≤ 6 için tekrar adımları:

Adm 4: geçerli çözüme l komşuluk yapısının uygulanması ile kısıtları sağlayan çözümler üretilir.

Adm 5: l komşuluk yapısı için üretilen her çözüm, iki amaç fonksiyonu değerlerine bakılarak Pareto kümesine alınmasına veya alınmamasına karar verilir. Verilen kararlar doğrultusunda Pareto kümesi güncellenir.

Adm 6: Pareto kümesinin güncellenmesi sonucunda kümeye yeni giren çözüm değerleri varsa bunlar incelenmemiş olarak "0" indisi ile belirtilir. İncelenmemiş çözüm değerlerinden herhangi birisi rassal olarak seçilir ve yeni pareto kümesi üzerinden l=l+1 alınır.

Sonlandırma: Durdurma kriterine ulaşıldığında işlemler durdurulur.

Şekil 1. ÇAGDKA algoritması için işlem adımları

2.1.1. ÇAGDKA İçin Kullanılan Komşuluk Yapıları

Çalışmada kullanılan komşuluk yapıları şu şekildedir:

- Rota İçi Değişim 1-1
- Rota İçi Değişim 2-1
- Rotalar Arası Değişim 1-1
- Rotalar Arası Değişim 2-1
- Rota İçi Kaydırma 2-0
- Rotalar Arası Kaydırma 1-0
- Rotalar Arası Kaydırma 2-0

2.1.2. Problem Formülasyonu

Çok amaçlı araç rotalama problemi için matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

Amaç fonksiyonları:

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot X_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min}K \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i,j} X_{ij} = 1 \quad \sum_{i,j} X_{ij} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j,j \neq i} X_{ij} = 1 \quad \sum_{j,j \neq i} X_{ij} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j D_i \cdot X_{ij} \leq Q \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0j} = K \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i0} = K \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (8)$$

d_{ij} : i ve j noktaları arası mesafe.

x_{ij} : i den hemen sonra j noktasına gidilecekse 1; değilse 0'dır.

Q : Araç kapasitesi.

D_i : i. müşterinin toplam ürün talebidir.

K : Araç sayısıdır.

i : 0,1,.....n

j : 0,1,.....n

(1) ve (2) numaralı amaç fonksiyonları sırasıyla minimum yol ve minimum araç sayısını göstermektedir. (3) ile gösterilen kısıtta bir noktaya gelen yolların sadece bir tane olması gerektiği ve (4) numaralı kısıtta ise bir noktadan sadece tek bir noktaya gidiş olması gerektiği ifade edilmektedir. (5) numaralı gösterim bir turdaki ziyaret edilen noktaların toplam talebinin araç kapasitesini aşmaması gerektiğini gösterirken, (6) ve (7) numaralı ifadeler depodan çıkan ve depoya gelen noktaların araç sayısına eşit olması gerektiği ifade edilmiştir.

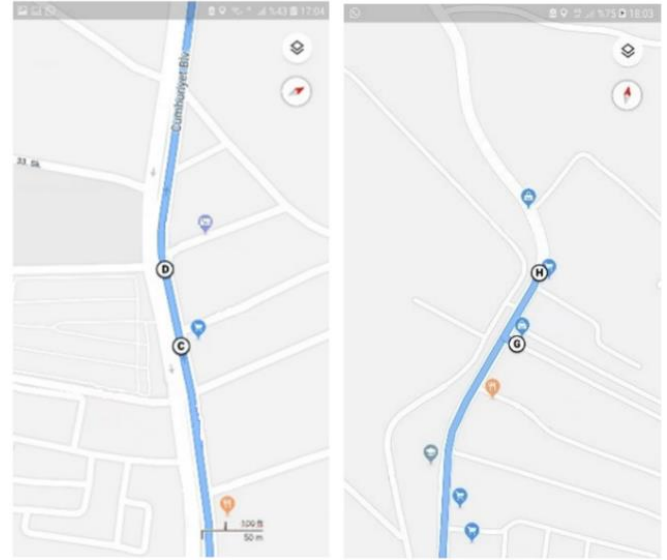
2.1.3. Pareto Güncelleme

Baskın olmayan çözümler kümesi Pareto kümesini oluşturmaktadır. Sunulan çalışmada yerel arama aşaması sonunda bulunan yeni çözümün kabul edilmesi, Pareto kümesine dahil edilmesi anlamına gelmektedir. Yeni çözüm Pareto kümesinde bulunan mevcut çözümlerle karşılaştırılmakta ve Pareto baskınlık ilişkisine göre karar verilmektedir. Gerçekleştirilen bu işlemde her iki amaç fonksiyonu değerleri de göz önüne alınmaktadır. Yeni çözümün herhangi bir amaç fonksiyonunun değeri, mevcut çözümlerin o amaç fonksiyonu için aldıkları değerlerden daha iyi ise çözüm kümeye dahil edilmektedir. Her iki amacı da mevcut çözümlerden iyi olmayan yeni çözümler kümeye dahil edilmez ve kümede bulunan incelenmemiş bir çözüm ile yeni arama tekrarlanır.

2.1.4. Problem

Çalışmada uygulama aşamasında ilk olarak işletmenin mevcut dağıtım rotaları gözlenmiş ve mesafeler kaydedilmiştir. Verilerin MATLAB programında işlenebilmesi için gerekli olan uzaklık matrisinin oluşturulması aşamasında, Google Haritalar üzerinden iki nokta arasındaki alternatif güzergahlar içinden en kısa uzaklığa sahip olanın seçilmesiyle km cinsinden mesafe değerleri girilmiştir. Aradaki mesafeler x_i, y_j ($i=1,2,...,43$ & $j=1,2,...,43$) matrisi üzerinde gösterilerek 1849 verinin girdisi yapılmıştır. 45 müşterisi olan işletmenin Şekil 2'de gösterildiği gibi dağıtım için çok yakın olan (60-100 metre arası) dört müşterisi için öbekleme yapılarak orta noktaları alınmıştır.

Gizlilik açısından işletmenin adı ve diğer bilgilere çalışmada yer verilmemiştir.



Şekil 2. Google haritalardan örnek görüntü

Haritadan gerçek verilerle oluşturulan uzaklık matrisinin (43*43) örnek bir kısmının görüntüsü Şekil 3'te sunulmuştur (Tabloda km değerleri 100 ile çarpılarak aktarılmıştır).

| | J | K | L | M | N | O |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 9 | 240 | 310 | 360 | 360 | 460 | 600 |
| 10 | 0 | 75 | 95 | 130 | 190 | 330 |
| 11 | 120 | 0 | 50 | 90 | 150 | 290 |
| 12 | 170 | 80 | 0 | 75 | 100 | 240 |
| 13 | 180 | 90 | 45 | 0 | 100 | 280 |
| 14 | 320 | 180 | 130 | 130 | 0 | 350 |

Şekil 3. Uzaklık matrisi

Problemin çözümü için akademik lisanslı MATLAB R2017b (9.3.0.713579) kullanılmış olup, programın çalıştırıldığı bilgisayar Intel(R) Core(TM) i5-6400 CPU @ 2.70GHz 2.71 GHz işlemci özelliğindedir.

İşletmenin mevcut kat ettiği mesafe 82,05 km olarak gözlenmiştir. ÇAGDKA yaklaşımının sonucunun kıyaslanması için, gerçek veriler kullanılarak mevcut güzergah verisi ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca müşterilerin x-y koordinatları ile çalıştırılarak Öklid mesafeleri kullanan Clarke & Wright algoritma tabanlı bir ARP çözücü olan programdan elde edilen sonuç ile karşılaştırma yapılmıştır. Söz konusu hazır paket program açık erişime sahip olup çalışma prensibi programın web sayfasında [16] şu şekilde açıklanmıştır:

“ARP çözücü, araç rotalama problemleri için Clarke-Wright tasarruf algoritmasının rastgele bir versiyonunu uygulamaktadır. Her müşterinin yerini (enlem ve boylam) ve talebi listeleyen bir metin dosyasından girdi almaktadır. Mesafeler açıkça girilebilir ya da “Öklid” veya “Büyük Daire” ölçümleri kullanılarak otomatik olarak hesaplanabilir. Her şehri tam olarak bir kez ziyaret eden ve kullanıcı tarafından belirlenen araç hacmi ve mesafe sınırlarına uyan araç rotaları oluşturur. Sonuçlar grafik (harita) biçiminde ve metin biçiminde görüntülenmektedir”.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

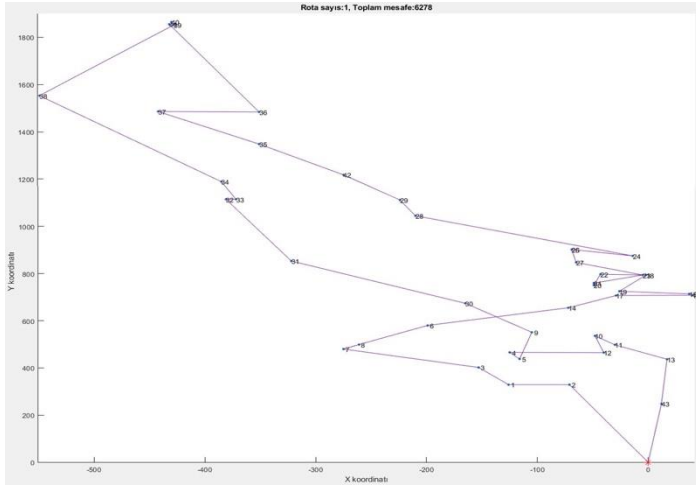
3.1. Elde Edilen Sonuçlar

GDKA yaklaşımının tek amaçlı araç rotalama problemleri üzerinde başarılı bir algoritma olduğu bilinmekte iken bu çalışma

sonucunda çok amaçlı araç rotalama problemleri üzerinde de başarılı sonuçlarına ulaşmıştır. Uygulama sonuçları incelendiğinde çok kısa sürede daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Şekil 4 ile 6 arasında sunulan sonuçların elde edilmesi 2,5 sn ile 6 sn arasında değişkenlik göstermiştir. Metasezgisel yöntemler kesin çözüm sunan yöntemlere göre daha kısa sürede ve kabul edilebilir iyi sonuçlar veren yöntemlerdir. Son yıllarda metasezgisel yöntemler geliştirilmeye devam etmektedir.

3.1.1. Gerçek Uzaklık Matrisinin Kullanımı

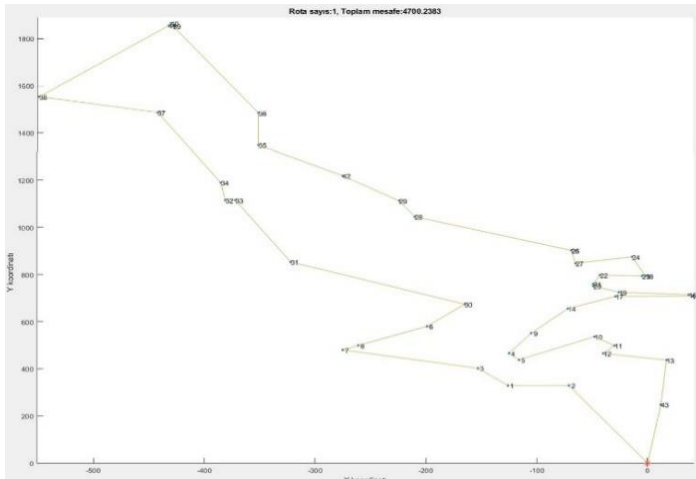
43 nokta için haritadan elde edilen gerçek verilerle ÇAGDKA uygulaması sonucunda mevcut 82,05 km rotaya karşılık 62,78 km ile 19,27 km daha kısa mesafe elde edilmesi sağlanmıştır. Günlük gerçekleştirilen bu dağıtım planı aylık olarak (20 gün) ele alındığında 385,4 km daha az yol katedilmesi, daha az maliyet ve daha az karbon emisyonu anlamına gelmektedir. Kullanılan yollarda trafik yoğunluğu açısından dikkate değer bir fark olmaması sebebiyle zaman boyutu kullanılmamıştır. Şekil 4'te elde edilen rotanın MATLAB program çıktısı gösterilmiştir. Depo "0" noktası ile gösterilmiştir.



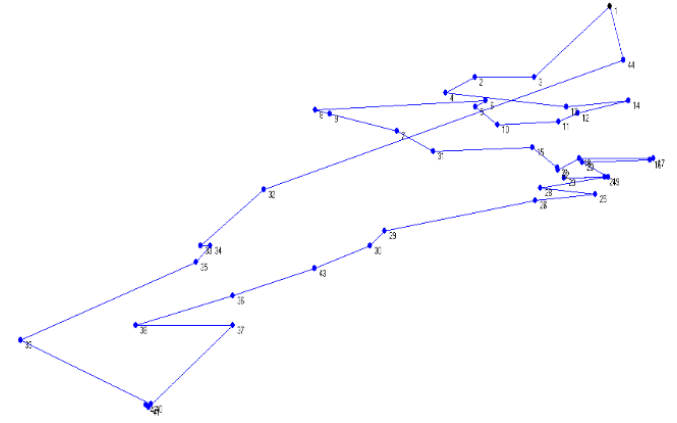
Şekil 4. Gerçek uzaklık değerleri ile ÇAGDKA uygulaması

3.1.2. Öklid Uzaklık Matrisinin Kullanımı

43 nokta için Öklid uzaklıkların kullanılmasıyla Clarke & Wright algoritmasını temel alan program çalıştırıldığında 70,03 km rotaya karşılık aynı uzaklık değerlerinin kullanılmasıyla ÇAGDKA çalıştırıldığında elde edilen 47 km ile 23,03 km daha kısa mesafe elde edilmesi sağlanmıştır. Şekil 5 ve 6'da elde edilen rotalar gösterilmiştir.



Şekil 5. Öklid mesafe değerleri ile ÇAGDKA uygulaması

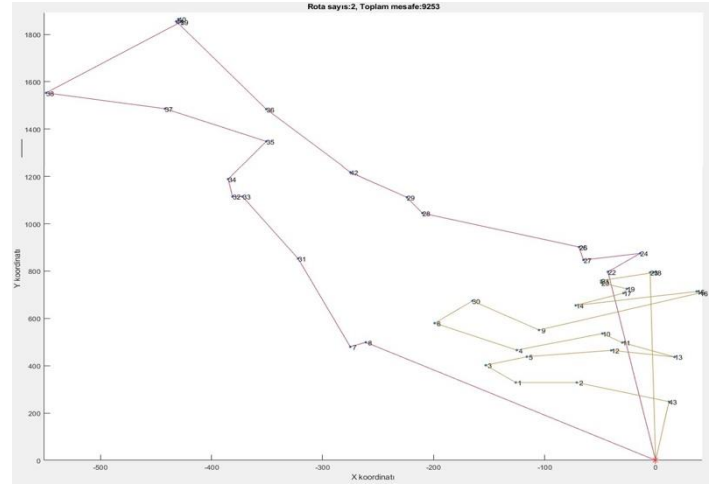


Şekil 6. Öklid mesafe değerleri ile Clarke & Wright algoritmasının uygulaması

Şekil 6'da Depo 1 numara ile gösterildiği için 44 nokta görülmektedir.

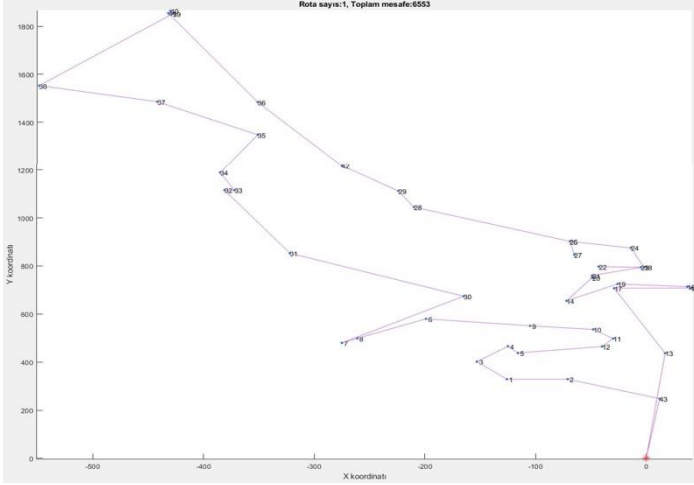
3.1.3. Birden Fazla Rota ile Uygulama

Bu çalışmada, ÇAGDKA uygulamasında pareto analizi ile iki amaç değerlendirilmektedir. İlk iki uygulamada başlangıçta tek rota ile uygulamalara geçilmesi araç sayısının en düşük kılınması amacını gösteremediği için Şekil 7'de gösterilen iki araç başlangıç çözümü ile program çalıştırılarak daha iyi bir sonuç elde edilmesi amacıyla program çalıştırılmıştır.



Şekil 7. İki rotalı başlangıç çözümü

Oluşturulan iki rotalı başlangıç çözümü 92,53 km şeklindedir. Araç sayısı ve mesafeyi minimum kılma amaçları doğrultusunda ÇAGDKA yaklaşımının uygulanması ile elde edilen sonuç Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekilde minimum araç sayısı 1 ve mesafe de 65,53 olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Rota ve mesafe amacının birlikte çalışması sonucunun gösterimi

3.2. Tartışma

Bulgular kısmında görüldüğü gibi ÇAGDKA yaklaşımı başarılı sonuçlar sunmaktadır. Elde edilen iyileştirmeler hem çevre hem de ekonomik açıdan katkılar sunmasıyla önem taşımaktadır. ÇAGDKA yaklaşımının daha farklı problemlere de uygulanabilmesi, ileride farklı alanlarda da katkısını sağlayabilecektir. Aynı zamanda amaç fonksiyonlarının farklılaştırılarak da değişik uygulamalarının gerçekleştirilmesi imkanı bulunmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar 2011 yılında Yumurtacı Aydoğmuş [17] tarafından tez çalışmasında geliştirilen ÇAGDKA yaklaşımının başarılı uygulamalara sahip olduğunu göstermektedir. Geliştirilen yöntem DKA yaklaşımının temel özelliği olarak da kabul edilen “fazla parametreye ihtiyaç duymaması” açısından kısa süreler içerisinde kabul edilebilir iyi sonuçlar sunmaktadır.

ÇAGDKA yaklaşımının uygulanmasıyla elde edilen sonuç %23,5 değerinde iyileşme sağlamıştır (82,05 km ile 62,78 km). Öklid mesafelerin kullanılmasıyla yapılan iki yöntem karşılaştırmasında ise, diğer yonteme göre ÇAGDKA yaklaşık %33 daha iyi sonuç vermiştir (70,03 km ile 47 km). İki rotalı ele alınan başlangıç çözümünün kullanılması ise mesafenin yanı sıra araç sayısında da düşüş meydana gelmiştir.

Kaynakça

- [1] Nagarajan, V., & Ravi, R. (2012). Approximation algorithms for distance constrained vehicle routing problems. *Networks*, 59(2), 209-214.
- [2] Pradenas, L., Oportus, B., & Parada, V. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling. *Expert Systems with Applications*, 40(8), 2985-2991.
- [3] Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2018). Incorporating driving cycle based fuel consumption estimation in green vehicle routing problems. *Sustainable cities and society*, 40, 214-221.
- [4] Bouyahyoiuy, K., & Bellabdaoui, A. (2021). A mixed-integer linear programming model for the selective full-truckload

multi-depot vehicle routing problem with time windows. *Decision Science Letters*, 10(4), 471-486.

- [5] Kuo, Y., & Wang, C. C. (2012). A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6949-6954.
- [6] Laporte, G., 2009, Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*. Vol.43, No.4, 408-416. Publisher:INFORMS.
- [7] Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E. G. (2008). From single-objective to multi-objective vehicle routing problems: Motivations, case studies, and methods. In *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges* (pp. 445-471). Springer, Boston, MA.
- [8] Kuo, Y. (2010). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 157-165.
- [9] Lin, S. W., Vincent, F. Y., & Lu, C. C. (2011). A simulated annealing heuristic for the truck and trailer routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 15244-15252.
- [10] Wei, L., Zhang, Z., Zhang, D., & Leung, S. C. (2018). A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European journal of operational research*, 265(3), 843-859.
- [11] Bernal, J., Escobar, J. W., Paz, J. C., Linfati, R., & Gatica, G. (2018). A probabilistic granular tabu search for the distance constrained capacitated vehicle routing problem. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 29(4), 453-477.
- [12] Caballero-Morales, S. O., Martínez-Flores, J. L., & Sánchez-Partida, D. (2018). An evolutive tabu-search metaheuristic approach for the capacitated vehicle routing problem. In *New Perspectives on Applied Industrial Tools and Techniques* (pp. 477-495). Springer, Cham.
- [13] Alba, E., & Dorronsoro, B. (2004). Solving the vehicle routing problem by using cellular genetic algorithms. In *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 11-20). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [14] Marinakis, Y., & Migdalas, A. (2007). Annotated bibliography in vehicle routing. *Operational Research*, 7(1), 27-46.
- [15] Azad, T., & Hasin, M. A. A. (2019). Capacitated vehicle routing problem using genetic algorithm: a case of cement distribution. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 32(1), 132-146.
- [16] VRP Solver, Larry Snyder, <https://coral.ise.lehigh.edu/larry/software/vrp-solver/>.
- [17] Yumurtacı Aydoğmuş, H. (2011). Değişken komşuluk arama sezgisel yaklaşımı ve tedarik zinciri yönetiminde bir uygulama. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı.