



Solution approaches for the green vehicle routing problem with time window and simultaneous pickup and delivery

Esra Boz^{1*}, Ahmet Çalık², Yusuf Şahin³

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, KTO Karatay University, Konya, 42020, Türkiye

²Department of Administrative, Balıkesir University, Balıkesir, 10145, Türkiye

³Department of Administrative, Mehmet Akif University, Burdur, 15100, Türkiye

Highlights:

- Time window, simultaneous pickup and delivery, green vehicle routing problem is considered jointly
- A mixed integer linear programming formulation is developed for the problem
- Linearization the mixed integer non-linear programming formulation

Keywords:

- Vehicle routing problem
- Weighted superposition algorithm
- Genetic algorithm

Article Info:

Research Article

Received: 29.09.2022

Accepted: 18.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1180965

Correspondence:

Author: Esra Boz

e-mail:

esrayasaarr@gmail.com

phone: +90 444 1251 / 7677

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the Time Window Vehicle Routing, Simultaneous Pickup and Delivery Vehicle Routing problems are addressed in an integrated method with the Green Vehicle Routing Problem, one of the key sustainability concerns on which both researchers and practitioners have been working hard recently. A mixed integer nonlinear mathematical model is developed after structurally designing the integrated problem. The linearization method is used in the solution to transform the mathematical model of the problem into a linear integer programming model. The problem solved with Genetic Algorithm and Weighted Superposition Attraction Algorithm. Additionally, the route developer algorithms 2-opt and or-opt are used. The results are given in Figure A.

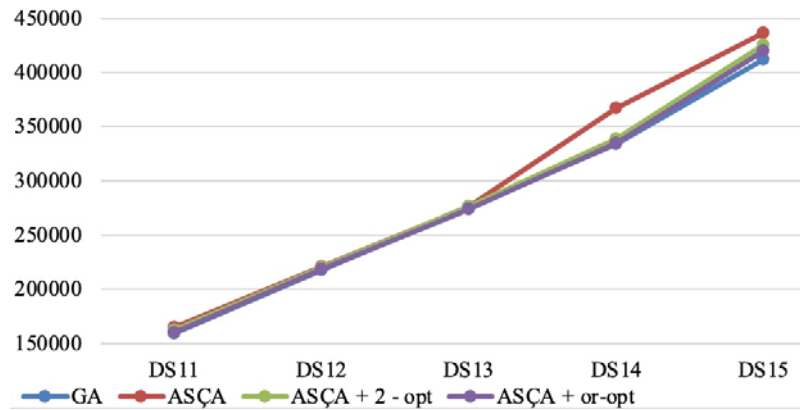


Figure A. The fitness function of the large data set

Purpose:

The aims of this study are to develop the new mixed integer linear programming model for the Joint Time Window Vehicle Routing and Simultaneous Pickup and Delivery Vehicle Routing problem, and to propose a solution algorithm.

Theory and Methods:

To handle the problem, a new mixed integer non-linear programming model is developed. The model is then linearized and solved using Genetic Algorithm and Weighted Superposition Attraction Algorithm.

Results:

Analyzing the findings indicates that small data sets can produce solutions with the same optimal solution as all four methods. The results of the algorithms do, however, differ significantly with an increase in the number of customers.

Conclusion:

The results show that GA offers superior result in terms of optimal solution and solution time. On the other hand, using the route developer Or-opt method along with Weighted Superposition Attraction Algorithm led to close to Genetic Algorithm solutions.



Zaman pencere ve eş zamanlı topla dağıt yeşil araç rotalama problemi için çözüm önerileri

Esra Boz^{1*}, Ahmet Çalık², Yusuf Şahin³

¹KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, 42020, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, İşletme, Balıkesir, 10145, Türkiye

³Mehmet Akif Üniversitesi, İşletme, Burdur, 15100, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Zaman pencere ve eş zamanlı topla dağıt yeşil araç rotalama için yeni bir matematiksel model önerilmiştir
- Ağırlıklı süperpozisyon çekim algoritması genetik algoritma ile kıyaslanmıştır
- Oluşturulan doğrusal olmayan matematiksel model doğrusallaştırılmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.09.2022

Kabul: 18.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1180965

Anahtar Kelimeler:

Araç rotalama problemi,
ağırlıklı süperpozisyon
çekim algoritması,
genetik algoritma

ÖZ

Araç rotalama problemi, merkezi bir depodan farklı konumlarda yer alan müşterilere belirli kapasiteye sahip araçlarla yapılacak dağıtım için en kısa dağıtım rotasının belirlendiği bütünlük bir optimizasyon problemidir. Artan çevresel duyarlılık ve problemin gerçek hayata daha uygun hale getirilmesi için zaman, eş zamanlı toplama ve dağıtım, rota uzunluğu, çoklu depo, teslimat bölme, yakıt tüketimi ve karbon emisyonu gibi kısıtlar probleme eklenerek yeni varyantlar ortaya konmuştur. Bu çalışmada, çevresel duyarlılığın ön plana çıktığı yeşil araç rotalama problemi, zaman pencere ve eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemleri bütünlük olarak ele alınmaktadır. Bu noktada, toplama ve dağıtım talepleri, siparişlerin teslim zamanları ve dağıtım esnasında sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için çevresel faktörler de önemli bir etken olarak göz önüne alınmıştır. Çalışma kapsamında Zaman Pencere ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Yeşil Araç Rotalama Problemi (ZPETDYARP) için yeni karma tamsayı doğrusal olmayan matematiksel model oluşturulmuş, belirli şartlar altında model doğrusallaştırılarak farklı yöntemler ile çözüm aranmıştır. ZPETDYARP'nin çözümünü için metasezgisel arama algoritmaları olan Genetik Algoritma (GA) ve Ağırlıklı Süperpozisyon Çekim Algoritması (ASÇA) kullanılmış, literatürdeki ilgili veriler entegre edilerek test verileri oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda çözüm uygunluk değeri ve çözüm süresi bakımından GA ile daha iyi sonuçlara ulaşılmış, or-opt sezgisel ile entegre edilen ASÇA ise GA ile elde edilen sonuçlara yakın ve tatmin edici sonuçlar vermiştir.

Solution approaches for the green vehicle routing problem with time window and simultaneous pickup and delivery

H I G H L I G H T S

- Time window, simultaneous pickup and delivery, green vehicle routing problem is considered jointly
- A mixed integer linear programming formulation is developed for the problem
- Linearization the mixed integer non-linear programming formulation

Article Info

Research Article

Received: 29.09.2022

Accepted: 18.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1180965

Keywords:

Vehicle routing problem,
weighted superposition
algorithm,
genetic algorithm

ABSTRACT

The vehicle routing problem is an integrated optimization problem in which the shortest distribution route is determined for the distribution to be made from a central depot to customers located at different coordinates, with vehicles with a certain capacity. Increasing environmental awareness and constraints such as time, simultaneous pickup and delivery, route length, multiple depots, load division, fuel consumption, and carbon emissions have been added to the problem. New variants have been introduced to make the problem more suitable for real life. In this study, the green vehicle routing problem, in which environmental sensitivity is at the forefront, and the simultaneous pickup and delivery vehicle routing problems with time windows are discussed in an integrated manner. At this point, environmental factors are also considered important factors to ensure sustainability during collection and distribution demands, delivery times of orders, and distribution. Within the scope of the study, a new mixed integer nonlinear mathematical model was proposed for the green and simultaneous pickup and delivery vehicle routing problem with time window (GSPDVRP-TW), and a solution was sought with different methods by linearizing the model under certain conditions. For the solution of GSPDVRP-TW, the metaheuristic search algorithms Genetic Algorithm (GA) and Weighted Superposition Attraction Algorithm (WSA) were used, and test data were created by integrating the relevant data in the literature. As a result of the experimental studies, better results were obtained with GA in terms of solution fitness value and solution time, and WSA integrated with the or-opt heuristic gave satisfactory results close to the results obtained with GA.

1. Giriş (Introduction)

Tüm dünyada artan çevre kirliliği, canlıların hayatta kalmasına yönelik en kritik tehditlerden biridir. Ulaşım, ısınma, endüstriyel süreçler ve enerji üretimi gibi süreçler nedeniyle her gün milyonlarca ton karbondioksit (CO₂) atmosfere yayılmaktadır. Son yıllarda yaşanan enerji krizlerine ve küresel ısınmayla başa çıkmak için ülkeler karbon vergisi ve karbon kotası gibi yeni politikalar ortaya koymaktadır [1]. Oldukça yüksek emisyon değerleri nedeniyle elektrik ve endüstriyel üretim alanlarında filtrasyon sistemleri kullanılırken, ulaşımda kullanılan araçların emisyon değerlerini azaltmak için de yeni sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır [2]. Hızlı endüstriyel ve ekonomik gelişmeler göz önüne alındığında, ulaştırma önemli bir CO₂ emisyonu kaynağıdır. Ulaştırma sektörü petrol ürünlerinin en büyük tüketicisi ve dünya çapında hava kirliliğinin baş aktörlerindedir [3]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) raporuna göre küresel CO₂ emisyonlarının %23' ü ulaştırma sektörü tarafından üretilmektedir [4].

Şirketlerin maliyetlerini düşürmeleri ve hammaddeden bitmiş ürünlere kadar olan süreci kapsayan müşteri hizmet kalitelerini iyileştirmeleri gerekir [5]. Lojistik, bireysel müşterilerin veya şirketlerin ihtiyaçlarını karşılamak için başlangıç noktası ile nihai tüketim noktası arasındaki kaynak akışının planlı yönetimi olarak tanımlanabilir. Lojistik yönetimi sürecinde, hammadde, yarı mamul, bitmiş ürünlerin tedarik, taşıma ve depolama faaliyetleri stratejik olarak yönetilmelidir [6, 7]. Lojistik, malların tedarikçilerden müşterilere kadar olan yolculuğunda nakliye ve depolama ile ilgili tüm faaliyetleri içine alan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon sayesinde malzeme ve ürünler ilk çıkış noktasından ihtiyaç duyulduğu nihai tüketim noktasına taşınırlar [8]. Üretim ve dağıtımdaki ürünlerin ağırlık ve hacim olarak büyümesi lojistik operasyonlarına ilişkin alanlarda optimizasyon çalışmalarını çok daha önemli hale getirmiştir [9]. Müşteri siparişlerinin gönderilebilmesi için en iyi rotalar kümesini elde etmeyi amaçlayan Araç Rotalama Problemleri (ARP) [10], lojistikte en çok çalışılan optimizasyon problemlerinden birisidir. Etkin ve doğru araç rotaları tasarlamak işletmelerin sadece ekonomik değil aynı zamanda çevresel ve sosyal yönlerini de etkilemektedir [11]. Yapılan araştırmalar toplam üretim maliyetinin %11-13 arasındaki kısmını taşıma maliyetlerinin oluşturduğu göstermektedir [9, 12].

İşletmelerin lojistik maliyetlerinin önemli bir kısmı malzeme, yarı mamul ve bitmiş ürünlerin taşınması ile ilgili maliyetlerden oluşur. Bu noktada, ARP ile ilgili işletme problemlerinin optimizasyonu işletmelere önemli maliyet avantajları sağlar. Klasik ARP'ye tarihsel süreç içerisinde yeni kısıt ve hedeflerin eklenmesiyle kapasite kısıtlı (KARP), mesafe ve kapasite kısıtlı (MKARP), geri toplamalı (GTARP), açık (AARP), çoklu depo (ÇDARP), bölünmüş teslimatlı (BTARP), periyodik (PARP), heterojen filolu (HFARP) ve bulanık araç rotalama problemi (BARP) gibi türleri ortaya çıkmıştır [13, 14]. Araç rotalama probleminin günümüzde en çok çalışılan uzantılarından birisi müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerinin yer aldığı eşzamanlı topla dağıtım araç rotalama problemidir (ETDARP) [15]. Yine benzer şekilde son yıllarda literatürde kendisine geniş bir yer bulan zaman pencereli araç rotalama probleminde (ZPARP) ise müşteriler en erken ve/veya en geç kabul sürelerine sahiptir. Bu problem türünde müşterilere belirli bir zaman aralığında hizmet verilmesi ve araçların belirli bir zaman aralığında çalışması gerekir [16].

Bu çalışmada, yapılacak dağıtım ve toplama işlemlerinin çevreye olan zararı azaltmak amacıyla araç yüküne bağlı yakıt tüketim maliyetini minimize edecek şekilde araç rotalarını oluşturmayı hedefleyen Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla Dağıtım Yeşil Araç Rotalama

Problemi (ZPETDYARP) bütünlük olarak ele alınmıştır. Öncelikle problemin ifade edilebilmesi için literatürde yer alan matematiksel modellerden yararlanılarak doğrusal olmayan bütünlük bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen ZPETDYARP modeli, standart araç rotalama problemi gibi NP-Zor problem sınıfında yer aldığı için de çözüm zamanı problem boyutuna bağlı olarak üstel artış göstermektedir. Bu nedenle, orta ve büyük boyutlu problemin çözümü için metasezgisel algoritmalara dayalı çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde problemlerle ilgili kaynak taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ZPETDYARP için önerilen doğrusal olmayan programlama modeli ve bu modelin doğrusallaştırılması süreci açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde çözüm için kullanılan yöntemler, beşinci bölümde deneysel çalışmalar ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar ile gelecek çalışmalara yönelik öneriler yer almaktadır.

2. Kaynak Taraması (Literature Review)

Literatürde ilk defa Dantzig ve Ramser [17] tarafından tanımlanan ARP, merkezi bir depodan aynı veya farklı kapasiteye sahip olan araç filosu ile bilinen talebe sahip olan müşteriler kümesine toplam dolaşım mesafesini veya süresini minimize edecek şekilde hizmet vererek tekrar depoya dönmeye için gerekli rotaların belirlendiği problemi ifade etmektedir [2, 13, 18]. Dantzig ve Ramser [17] tarafından tanımlanmasının ardından çözümü için iki müşteriyi aynı rotada birbirine bağlamak için tasarrufları hesaplama fikrine dayanan Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması [19] bu problemin çözümü için önerilmiştir. Takip eden yıllarda çeşitli kısıtlama ve hedeflerin eklenmesiyle yöneylem araştırması alanında ARP'nin çok sayıda varyantı sunulmuş ve çeşitli yöntemlerle çözüm aranmıştır [19]. ARP'nin çözümü için kesin çözüm yöntemleri olarak dinamik programlama [20, 21], dal ve sınır algoritması [22, 23], dal ve kesme algoritması [24, 25] ve küme bölme algoritması [26, 27] gibi algoritmalar literatürde yer almaktadır. Ancak NP-Zor yapısı nedeniyle özellikle orta ve büyük boyutlu varyantları için sezgisel ve metasezgisel yöntemler daha çok tercih edilmiştir. Takip eden kısımda özellikle YARP, ZPARP ve ETDARP problemlerinden iki veya daha fazlasına birlikte çözüm arandığı çalışmalara yer verilmiştir.

Son yıllarda araç rotalama ile ilgili literatürde yeşil kavramına olan ilginin arttığı gözlemlenmektedir. İlk olarak Erdoğan ve Miller-Hooks [28] tarafından tanımlanan YARP ile ilgili yapılan çalışmalarda yakıt tüketimine ve emisyon değerine etki eden birçok parametre kullanılmış olmakla beraber hız, taşınan yük miktarı, motor tipi ve büyüklüğü, araç dizaynı ve yol eğimi gibi faktörlerin bu konuda daha çok etki ettiği belirlenmiştir [29, 30]. Bektaş ve Laporte [31] klasik ARP'nin bir uzantısı olan Kirlilik Rotalama (Pollution Routing) Problemini (KRP), sadece seyahat mesafesini değil aynı zamanda sera gazı emisyonlarını ve yakıt miktarını da hesaba katan daha geniş ve daha kapsamlı bir amaç fonksiyonu ile tanımlamıştır. Seyahat süresi ve maliyetleri zaman pencereli ve zaman pencerencesiz KRP için önerilen matematiksel modeller kullanılarak gerçekçi örnekler üzerinde hesaplama deneyleri yapılmıştır. Demir vd. [32], Bektaş ve Laporte [31] tarafından KRP için önerilen matematiksel modeli genişletmiş ve çözümü için adaptif komşuluk arama sezgiselini kullanmıştır. Literatür incelendiğinde elektrikli araçların kullanıldığı taşıma sistemleri için yapılan çalışmaların bazılarının da YARP olarak değerlendirildiği görülmektedir. Schneider vd., [33] şarj istasyonları ve zaman penceresinin dikkate alındığı YARP'yi değişken komşuluk arama ve tabu arama algoritmalarından oluşan hibrit bir yöntem ile çözmüştür. Lin vd., [34] ETDARP'yi ekonomik hem de çevresel kriterleri, yani maliyet ve CO₂ emisyonlarını en aza indirerek çözmek için genetik algoritma esaslı bir yöntem önermiştir. Majidi vd., [35] yakıt tüketiminin, emisyon miktarlarının, eşzamanlı teslim alma ve

teslim etme ile zaman penceresinin dikkate alındığı YARP' yi karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli olarak modellemiştir. Dağıtım ve toplama taleplerinin belirsiz olduğu koşullarda bulanık YARP 'ye dönüşen problemin çözümü için yeni ekleme ve çıkarma operatörlerinin yer aldığı bir geniş komşuluk arama algoritması önerilmiştir. Majidi vd., [36], Bektaş ve Laporte [31] tarafından tanımlanan KRP'nin eşzamanlı toplama ve dağıtımlı versiyonunu ele almıştır. Doğrusal olmayan matematiksel formülasyonun çözümü için adaptif geniş komşuluk arama yöntemi kullanılmıştır. Madankumar vd., [37] bir yarı iletken tedarik zincirindeki ETARP'nin çözümü için iki adet karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. İlk model yardımıyla ETDARP'de bir dizi talebi ihlal etmeden karşılamak için alternatif yakıtlı araçlar için minimum maliyetli rotalar ve çizelgeler kümesini bulunmuştur. İkinci modelde ise farklı yakıt ikmal istasyonlarında farklı yakıt fiyatlarına sahip olma senaryosunu ele almak için birinci modeli genişletilmiş ve hem rota maliyetini hem de yakıt ikmal maliyetini içeren alternatif yakıtlı araçların işletme maliyetlerinin toplamını en aza indirmek hedeflenmiştir.

Yu vd., [38] zaman pencereli ve heterojen filolu YARP'nin kesin çözümü için dal-fiyat algoritması kullanmıştır. Geliştirilen çözüm yaklaşımında çözümü hızlandırmak için etiketleme algoritmasına dayalı çok amaçlı dinamik programlama ve üst sınır elde etmek için de tamsayı dallanma yöntemi önerilmiştir. Xu vd., [39] zamanla değişen araç hızı ve yumuşak zaman pencereli YARP için çok amaçlı bir karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli olarak geliştirilmiştir. Trafik sıklığına hesaba katmak için araç yükü ve kapasitesinin yanı sıra zamanla değişen hızın da dikkate alındığı model geliştirilmiş baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA-II) ile çözülmüştür. Li vd., [40] çok amaçlı ve çok depolu yeşil araç rotalama probleminin verimli bir şekilde çözülebilmesi için karınca kolonisi optimizasyonu algoritması kullanmıştır. Macrina vd., [41] elektrikli ve içten yanmalı motorlu araçlardan oluşan karma bir araç filosunun rotalanması problemini zaman pencereli YARP olarak ele almış ve çözümü için iteratif komşu arama algoritmasını kullanmıştır. Yu vd., [42] zaman pencereli ve büyük boyutlu YARP'nin çözümü için adaptif geniş komşuluk arama algoritmasını kullanmıştır. Önerilen yöntemde, büyük miktarda karbon emisyonuna neden olan müşteriler uygun ve hızlı bir şekilde kaldırılmakta ve bu müşteriler gelecekteki onarım operatörlerinde daha uygun şekilde düzenlenmektedir. Tamir operatörlerinde hızlı bir ekleme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde yeni bir rotanın fizibilitesi için tüm

müşterileri kısıtlamalarının kontrol edilmesi yerine yeni eklenen müşteriden sonraki kısımda müşterilerin kısıtlamaları kontrol edilerek değerlendirilmektedir.

Utama vd., [43] yakıt ve geç kalma maliyetlerinden oluşan toplam dağıtım maliyetinin minimize etmenin hedeflendiği zaman zaman pencereli YARP'nin çözümü için yapay arı kolonisi algoritmasını kullanmıştır. Dengiz vd., [44], evde sağlık hizmetleri için kullanılan araçların rotalanması probleminde karbon salınımının en küçüklenmesi için YARP'nin yanı sıra zaman penceresini de dikkate alarak incelemiştir. Birden fazla amaç olması nedeniyle problem çok amaçlı hedef programlama modeli olarak modellenmiştir. Khajouei ve Pilevari [45] heterojen filo ve çevresel durumların dikkate alındığı ETDARP'yi iki amaçlı matematiksel model olarak modellemiş ve ağırlıklı doğrusal programlama metrik yöntemiyle boyutsuz bir amaç haline getirilmiştir. Önerilen modele GAMS programı yardımıyla çözüm aranmıştır. Fakhrzad vd., [46], talep belirsizliği altında yeşil araç rotalamanın yapıldığı ETDARP için yeni bir model geliştirmiştir. Problemin karmaşık yapısı nedeniyle çözümü için değişken komşuluk arama esaslı iki aşamalı bir yöntem kullanmışlardır. Prajapati vd., [47] tarımsal gıda ürünlerinin birden fazla çiftçi lokasyonunda mevcut olduğu ve e-perakendeciler, süpermarketler, bakkallar, restoranlar, oteller vb. işletmeler tarafından talep edildiği entegre bir ilk kilometre teslim alma ve son kilometre teslimat lojistik problemini tanıtmıştır. Geliştirilen modelde, karbon emisyon vergisi, envanter tutma, kazalardan kaynaklanan araç ve gıda hasarları ve geç teslim alma ve teslimat cezaları ile ilgili maliyetler dikkate alınmaktadır. Önerdikleri karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modelini parçacık sürüşü optimizasyonu, benzetimli tavlama, ateş böceği ve komşuluk cazibeli ateş böceği algoritmaları ile çözmüşlerdir. Buraya kadar incelenen çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan yöntemler Tablo 1'de özetlenmektedir.

3. Problem Tanımı ve Model (Problem Definition and Model)

Araç rotalama problemi, köşe noktaları (V) ve bu noktaları birleştiren köprülerden oluşan yönlendirilmemiş çizgiler kümesi $\{G=(V, E)\}$ üzerinde tanımlanır [13, 48]. Küme içerisindeki her bir düğüm negatif olmayan bir talebe (d_i) ve servis süresine (s_i) sahiptir ve ilk düğüm homojen araçların yer aldığı depoyu ifade eder. Düğümler arası bağlantılar (köprüler) yine negatif olmayan maliyet veya seyahat süresine (s_i) sahiptirler. ARP'de müşterilerin sadece bir defa ve tek bir araç ile ziyaret edildiği, her bir rotanın ise depodan başlayıp yine

Tablo 1. Literatür özeti (Related literature)

No	Yayın	Problem				Çözüm Yöntemi		
		KRP	YARP	ZPARP	ETDARP	Kesin	Sezgisel	Metasezgisel
1	Bektaş ve Laporte [31]	□				□		
2	Demir vd., [32]	□					□	
3	Schneider vd., [33]		□	□			□	□
4	Lin vd., [34]		□		□			□
5	Majidi vd., [35]		□	□	□□		□	
6	Majidi vd., [36]	□			□		□	
7	Madankumar vd., [37]		□		□	□		
8	Yu vd., [38]		□	□		□		
9	Xu vd., [39]			□				□
10	Li vd., [40]		□					□
11	Macrina vd., [41]		□	□			□	
12	Yu vd., [42]		□	□			□	
13	Utama vd., [43]		□	□				□
14	Dengiz vd., [44]		□	□		□		
15	Khajouei ve Pilevari [45]				□	□		□
16	Fakhrzad vd., [46]		□		□		□	
17	Prajapati vd., [47]		□	□				□

depoda son bulunduğu dolaşım rotaları belirlenmeye çalışılır [13, 49]. Problemin gerçek yaşam problemlerine yaklaştırılması için kapasite kısıtı, zaman penceresi, eş zamanlı dağıtım ve toplama gibi durumların eklenmesiyle yeni varyantları ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada da emisyon değeri, zaman penceresi ve eş zamanlı dağıtım ve toplamanın yer aldığı Zaman Pencere ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Yeşil Araç Rotalama Problemi (ZPETDYARP) ele alınmaktadır. Bu problem içerisinde, depodan ürün sipariş eden müşterilerin belirli bir zaman penceresi vardır ve müşterilere bu zaman penceresinden önce ürün teslimatı yapılmak istendiği takdirde erken teslim zamanına kadar beklenmekte, zaman penceresinden sonra ürün teslimatı yapılmak istendiği takdirde ise şirkete gecikme miktarına göre gecikme maliyeti olarak yansıtılmaktadır. Taşıma sayısındaki artış yakıt tüketimini ve dolayısıyla karbon salınımını artırmaktadır. Bu nedenle, değişken karbon emisyon maliyeti de dikkate alınmaktadır. Bütünsel olarak bu yeni durumların yer aldığı bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli oluşturulmuştur. Modelin genel yapısı oluşturulurken Keçeci vd., [50], yakıt tüketimi hesaplaması ise Chen vd. [51] temel alınmış ve hesaplamalarda çeşitli ekleme ve değişiklikler yapılarak modele son hali verilmiştir. Modelde kullanılan notasyonlar ve modelin detayları aşağıda sunulmuştur.

Notasyon:

Kümelere

K : Araçlar kümesi
 N_0 : Depo
 N : Düşümler kümesi
 N_i : Müşteriler kümesi

Parametreler

c_e : CO₂ birim salınım maliyeti (para birimi)
 c_x : Kilometre birim maliyeti (para birimi)
 c_t : Gecikme birim maliyeti (para birimi)
 d_{ij} : i ve j düşümleri arasındaki mesafe (kilometre)
 e_0 : Yüksüz araç için birim mesafe başına tüketilen yakıt miktarı (litre)
 μ : Yüklü araç için birim mesafe başına ek yakıt tüketimi (litre)
 M : Toplam araç sayısı (adet)
 Q : Araç kapasitesi (kilogram)
 d_i : i müşterisinin dağıtım için talep ettiği ürün miktarı (kilogram)
 p_i : i müşterisinin toplama için talep ettiği ürün miktarı (kilogram)
 t_{ij} : i ile j müşteri arasında gidilen mesafenin süresi (saat)
 r_k : Aracın depodan çıkış süresi (saat)
 $(\&_i, \beta_i)$: i müşterisinin zaman penceresi (saat)
 s_i : i müşterisinin servis süresi (saat)

Karar değişkenleri

u_{ij} : (i,j) bağlantısı boyunca taşınan dağıtım talepleri miktarı (kilogram)
 v_{ij} : (i,j) bağlantısı boyunca taşınan toplama taleplerinin miktarı (kilogram)
 x_{ijk} : k aracı i düşümünden sonra j düşümüne gidiyorsa 1, aksi takdirde 0
 g_i : i müşterisinin gecikmesi (saat)
 b_{ik} : k aracı i düşümüne gidiyorsa 1, aksi takdirde 0
 a_i : i müşterisine ürünlerin gidiş zamanı (saat)

Amaç Fonksiyonu:

$$\min. Z = c_e (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij}) [e_0 + \mu \sum_i \sum_j u_{ij}] + \sum_i \sum_j c_x d_{ij} x_{ijk} + \sum_i g_i c_t \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_k \sum_j x_{0jk} = M \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_i x_{i0k} = M \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_i x_{ijk} = 1 \quad \forall j / 0 \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ijk} - \sum_j x_{jik} = 0 \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$u_{ij} + v_{ij} \leq \sum_k Q x_{ijk} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_j u_{ji} - \sum_j u_{ij} = d_i \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_k d_j x_{ijk} \leq u_{ij} \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$u_{ij} \leq \sum_k (Q - d_i) x_{ijk} \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\sum_j v_{ij} - \sum_j v_{ji} = p_i \quad \forall i \quad (10)$$

$$\sum_k p_i x_{ijk} \leq v_{ij} \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$v_{ij} \leq \sum_k (Q - p_i) x_{ijk} \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$u_{i0} = 0 \quad \forall i \quad (13)$$

$$v_{0i} = 0 \quad \forall i \quad (14)$$

$$a_i \geq r_k + t_{0i} - M(1 - b_{ik}) \quad \forall i, k \quad (15)$$

$$a_j \geq a_i + t_{ij} + s_i - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j, k \quad (16)$$

$$g_i \geq (a_i - \beta_i) \quad \forall i \quad (17)$$

$$a_i \geq \&_i \quad \forall i \quad (18)$$

$$\sum_j x_{ijk} = b_{ik} \quad \forall i, k \quad (19)$$

Modelde (1) ile gösterilen amaç fonksiyonu karbon emisyonu maliyeti, mesafe maliyeti ve gecikme maliyeti olmak üzere üç adet bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşende problem içerisindeki karbon emisyon maliyeti, yola ve taşınan ürün miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Burada u_{ij} ve d_{ij} olmak üzere iki karar değişkeninin çarpılmasından dolayı ilgili model doğrusal olmayan bir yapıya dönüşmektedir. İkinci bileşen, müşterilere ulaşırken aracın kat ettiği mesafe maliyetidir. Son bileşen olan üçüncü bileşen ise dağıtım ve toplama talepleri müşterilere ulaştığında müşteri zaman penceresine göre yaşanan gecikmenin maliyetidir. (2) ve (3) numaralı kısıtlar en fazla M sayıda aracın depodan çıkmasını ve depoya giriş yapmasını sağlamaktadır. (4) numaralı kısıt her müşteriye yalnızca bir kez gidilmesi zorunluluğunu ifade etmektedir. (5) numaralı kısıt araç rotalama probleminde akışı sağlayan kısıttır. (6) numaralı kısıt araç kapasite kısıtıdır ve bu kısıtla (i, j) hattı boyunca taşınan dağıtım ve toplama miktarlarının aracın toplam taşıma kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. (7) numaralı kısıt, i düşümüne bırakılan ürün miktarının i müşteri talebi kadar olmasını gerektiğini ifade etmektedir. (8) ve (9) numaralı kısıtlar, toplam dağıtılan ürün miktarının alt ve üst sınırlarıdır. (i, j) bağlantısı boyunca taşınan toplam dağıtım miktarı en az i müşterisinin dağıtım talebi kadar, en fazla araç kapasitesinden i

müşterisinin dağıtım talebi haricindeki kalan miktar kadar olabilmektedir. (10) numaralı kısıt i müşterisinden alınacak olan toplama talebini i müşterisinin toplama talebine eşitlemektedir. (11) ve (12) numaralı kısıtlar toplam toplanan ürün miktarının alt ve üst sınır kısıtlarıdır. (i,j) bağlantısı boyunca taşınan toplama taleplerinin miktarı en az i müşterisinin toplama talebi kadar, en fazla araç kapasitesinden i müşterisi toplama talebi haricindeki kalan miktar kadar olabilmektedir. (13) numaralı kısıt, araçların depoya geldiğinde dağıtılacak ürün miktarının sıfır olması gerektiğini ifade etmektedir. (14) numaralı kısıt ise depodan ayrılırken mevcut toplama miktarının sıfır (0) olması gerektiğini göstermektedir. (15) numaralı kısıtta aracın depodan çıktıktan sonra ziyaret ettiği ilk müşteriye ulaşma süresi hesaplanmaktadır. (16) numaralı kısıtta ise aracın sonraki müşterilere ulaşma süresi hesaplanmaktadır. (17) numaralı kısıt ile müşterilerde yaşanan gecikme süresi hesaplanmaktadır. (18) numaralı kısıtta müşterilere erken gitmeye izin verilmediği için müşteriye ulaşılan sürenin müşteri zaman penceresindeki erken gidiş süresinden büyük olması sağlanmaktadır. Son olarak (19) numaralı kısıt ise müşterilerin ilgili araçlara bağlayan yardımcı karar değişkenini ifade etmektedir.

3.1. Modelin Doğrusallaştırılması (Linearization of the model)

Amaç fonksiyonunun ilk bileşeninin doğrusal yapıda olmaması matematiksel modelin de doğrusal olmamasına neden olmaktadır. Bu aşamada modelin doğrusal bir yapıya kavuşabilmesi için doğrusallaştırma işlemi yapılması gerekir. Doğrusallaştırma şartları gereği amaç fonksiyonu aşağıda ifade edilen yöntem ile doğrusallaştırılabilir. Eğer $z = x \times y$, x ikili tamsayı ve y sürekli karar değişkeni ise aşağıdaki eşitsizlikler yardımıyla doğrusallaştırma işlemi yapılabilir. (20) ve (23) nolu eşitsizliğe göre x sıfır ise z sıfır olmalıdır. (21) ve (22) nolu eşitsizliklere göre ise $x = 1$ ise $z = y$ olmalıdır. Burada H büyük bir sayıyı temsil etmektedir [52]:

$$z \leq H \times x \quad (20)$$

$$z \leq y \quad (21)$$

$$z \geq y - (1 - x)H \quad (22)$$

$$z \geq 0 \quad (23)$$

Bu doğrusallaştırma işlemi neticesinde (1) nolu denklemde sunulan amaç fonksiyonu (24) nolu denklemde belirtildiği üzere bir f değişkenine eşitlenir.

$$f = ce(\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij}) [e_0 + \mu \sum_i \sum_j u_{ij}] \quad (24)$$

Ardından bu eşitlik sırasıyla Denklem (25), (26) ve (27)'de gösterilen işlemlerle düzenlenir.

$$f = ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij}) + (ce \mu \sum_k \sum_i \sum_j u_{ij} x_{ijk} d_{ij}) \quad (25)$$

$$-ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij}) = (ce \mu \sum_k \sum_i \sum_j u_{ij} x_{ijk} d_{ij}) \quad (26)$$

$$(f - ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij})) / ce \mu = (\sum_k \sum_i \sum_j u_{ij} x_{ijk} d_{ij}) \quad (27)$$

Son olarak (27) nolu denklem aşağıdaki denklemler aracılığı ile doğrusallaştırılır. Burada M büyük bir sayıyı ifade etmektedir.

$$(f - ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij})) / ce \mu \leq M \sum_i \sum_j u_{ij} \quad (28)$$

$$(f - ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij})) / ce \mu \leq M \sum_i \sum_j x_{ijk} d_{ij} \quad (29)$$

$$(f - ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij})) / ce \mu \geq M \sum_i \sum_j x_{ijk} d_{ij} - M(1 - \sum_i \sum_j u_{ij}) \quad (30)$$

$$(f - ce e_0 (\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} d_{ij})) / ce \mu \geq 0 \quad (31)$$

Doğrusallaştırma işleminin ardından modelin amaç fonksiyonu Denklem (32)'de gösterildiği hale dönüşecektir.

$$\min. Z = f + \sum_i \sum_j cx d_{ij} x_{ijk} + \sum_i t_i c_t \quad (32)$$

Sonuç olarak amaç fonksiyonu için (32) numaralı denklem ile model kısıtları ise (2)-(19) ve (29)-(31) arasındaki eşitsizlikler ile ifade edilmektedir. Bu işlemlerin ardından önerilen yeni karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli, karma tamsayılı doğrusal programlama modeline dönüştürülmüştür. Ele alınan problemle ilgili deneysel çalışmalar bu doğrusal model üzerinden yapılmıştır.

4. Çözüm Yöntemleri (Solution Methods)

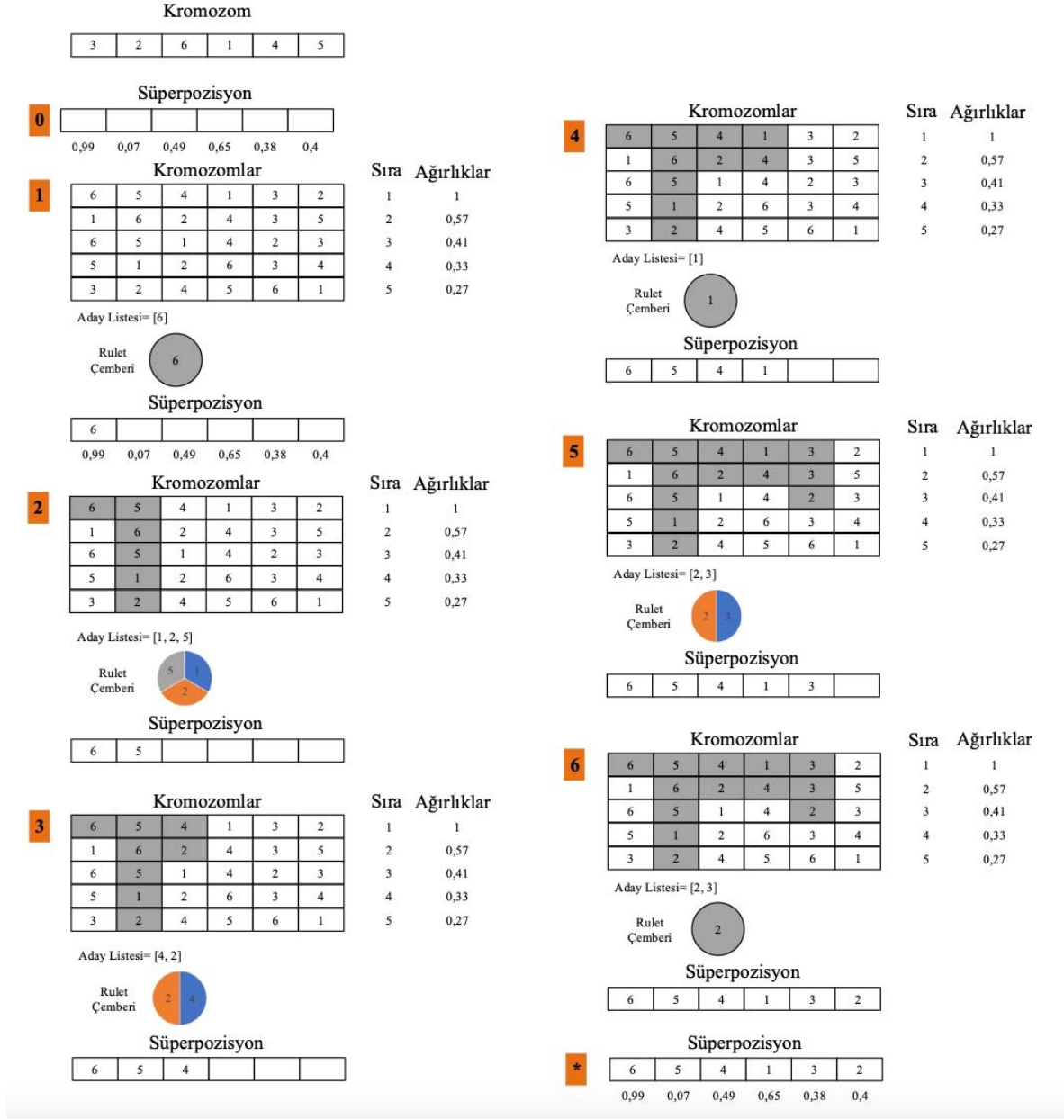
ARP ve yeni kısıtlamalar eklenmesiyle oluşan ETDARP, YARP ve ZPARP gibi varyantları NP-Zor sınıfta yer alan problemlerdir. NP-Zor problemler polinom zamanda (kabul edilebilir sürede) kesin çözümüne ulaşılmaması zor olan problemlerdir. Bu özellikleri nedeniyle de çözümü için genellikle sezgisel ve metasezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ZPETDYARP'nin çözümü için Baykasoğlu ve Akpınar [53] tarafından önerilen Ağırlıklı Süperpozisyon Çekim Algoritması (ASÇA) ve Holland [54] tarafından geliştirilen klasik Genetik Algoritma metasezgiselinden yararlanılmıştır. Takip eden alt bölümlerde bu yöntemlerle ilgili özet bilgiler sunulmaktadır.

4.1. Ağırlıklı Süperpozisyon Çekim Algoritması (Weighted Superposition Attraction Algorithm- WSA)

Baykasoğlu ve Akpınar [53] tarafından geliştirilen Ağırlıklı Süperpozisyon Çekim Algoritması (ASÇA) birçok doğal sistemde ve aynı zamanda sosyal gruplarda da fark edilen "süperpozisyon" ve "ajanların çekici hareketi" olmak üzere iki basit ilkeye dayanmaktadır. Ajanların çekim hareketi ile birlikte sistemin canlı doğasına göre süperpozisyondaki dinamik değişiklikleri taklit etmeye çalışır [53, 55]. ASÇA'nın farklı problem çeşitleri için uygulamaları [56, 57] literatürde yer almaktadır. Bu çalışmada kombinatorial bir probleme uygulanması nedeniyle Baykasoğlu ve Şenol [58] tarafından tanımlanan özel hali kullanılmıştır. ASÇA'nın kombinatorial problemler için geliştirilen özel halinde başlangıç popülasyonu, sıralama, süperpozisyon üretimi, parçacığın sonraki hareketini belirleme, çarpazlama ve hareket mekanizması gibi temel bileşenler bulunmaktadır.

Algoritmanın ilk adımında önceden belirlenmiş sayıda uygun çözümle birlikte süreç başlar. ASÇA'nın arama sürecine rehberlik edecek parametre değerleri de yine bu aşamada belirlenir. Diğer arama esaslı çözüm yöntemlerinden farklı olarak ASÇA'nın arama uzayının çeşitli noktalarını ziyaret ederek değerlendirmesini sağlayan kendine özgü bir arama mekanizması vardır. Bu mekanizma içerisinde komşuluk oluşturma, süperpozisyonun belirlenmesi, arama yönü belirleme prosedürü ve pozisyon güncelleme gibi mekanizma ve prosedürler yer almaktadır. Süperpozisyon belirleme ile ilgili bir örnek Şekil 1'de verilmiştir. Örnekte bir kromozom verilmiş, ardından aday listeler oluşturulmuş ve belirli ağırlıklar verilerek adaylar değerlendirilmiş, son olarak ise en iyi durum olan süperpozisyon oluşturulmuştur.

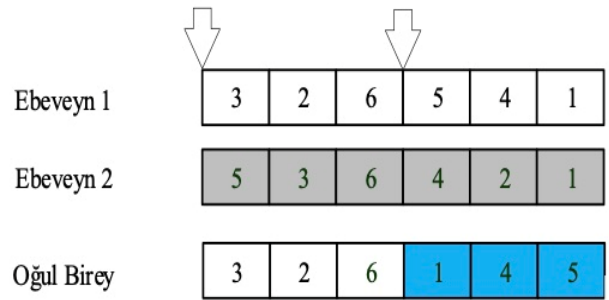
Arama mekanizması maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam eder. Her bir iterasyonda ilk olarak çözümler uygunluk değerine göre sıralanır. Sıralanan çözümlere uygunluk değerlerine göre ağırlık atanır ve çözümleri hareket ettirmek için hedef noktalar belirlenir. Çözümler belirlenen yönde hareket ettirilir ve uygunluk değerlerine göre en iyi çözüm ve en iyi uygunluk değerleri



Şekil 1. Süperpozisyon üretimi (The generation of superposition)

güncellenerek süreç devam eder. Burada çözümlerin hareket ettirilmesi ile, süperpozisyon üretimi ve en iyi olan süperpozisyondan yeni bir ajanın (bireyin) üretilmesi kastedilmektedir. Bu üretim ise çaprazlama operatörü ile gerçekleştirilir. Eğer süperpozisyonun uygunluk değeri parçacığın uygunluk değerinden daha iyi ise çaprazlama işlemi ile yeni bir parçacık oluşturulmaktadır. Bunun için Baykasoğlu ve Şenol [58] Doğrusal Sıralı Çaprazlama yöntemini kullanmıştır. Buna göre, parçacık üzerinde iki farklı nokta seçilir. Seçilen noktaların ilk kısmı birinci ebeveynden alınarak oğul bireye eklenir. Kalan kısım ise sondan başa doğru hücreler kontrol edilerek (değerler tekrar etmeyecek şekilde) ikinci ebeveynden alınarak oğul bireye eklenir. Böylelikle yeni bir birey oluşturulmuş olur. İlgili örnek Şekil 2’de belirtilmiştir.

ASÇA’nın temel adımları Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Doğrusal sıralı çaprazlama gösterimi (Linear sequential crossover encoding)

Tablo 2. ASÇA temel adımları (The main steps of ASCA)

Adım	Açıklama
0	Algoritmanın parametre değerlerini gir.
1	Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluştur.
2	Amaç fonksiyon değerlerine göre başlangıç popülasyonunu sırala
3	Eğer iterasyon sayısı < max iterasyon sayısından, Adım 4'e geç; aksi takdirde Adım 11'e geç.
4	Her parçacık için bir süperpozisyon tanımla.
5	Süperpozisyonların amaç fonksiyonu değerlerini hesapla.
6	En iyi süperpozisyonu bul
7	Her parçacığın amaç fonksiyonu ile süperpozisyonunun amaç fonksiyonu değerini kıyasla. Eğer Süperpozisyon değeri daha iyiyse Adım 8'ye geç, aksi takdirde Adım 9'a geç.
8	Parçacık ile süperpozisyonu çaprazlama yap ve Adım 10'a geç.
9	Levy flight mekanizmasını uygula.
10	En iyi amaç fonksiyonu değerini bul, $\text{İterasyon sayısı} = \text{iterasyon sayısı} + 1$; Adım 3'e geç.
11	En iyi amaç fonksiyonu değerini raporla.

4.2. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

Bu çalışmada, ASÇA'nın performansını kıyaslayabilmek için ele alınan probleme Genetik Algoritma (GA) yöntemiyle de çözüm aranmıştır. GA, diğer arama esaslı yöntemlerden farklı olarak popülasyon olarak ifade edilen rastgele çözüm kümesi ile süreç başlar. Bir tek noktadan hareket etmek suretiyle çözüm uzayını taramak yerine birden fazla çözüm noktasına karşılık gelen popülasyon kullanılmak suretiyle iyi çözümlerin bulunabileceği alanlar araştırılır. Bu popülasyon içerisinde yer alan bireyler kromozom olarak ifade edilir ve her biri bir çözüme karşılık gelir. Kromozomu oluşturan her bir parçaya gen adı verilir. Mevcut üzerinde yapılan çaprazlama ve mutasyon işlemleri sayesinde evrim geçiren mevcut kromozomlardan yeni kromozomlar oluşturulur. Yeni kromozomlar ile mevcut kromozomların çözüm kaliteleri uygunluk fonksiyonu ile değerlendirmeye tabi tutulur. Popülasyon büyüklüğünün sabit tutulması adına ebeveynler ve bu ebeveynlerden üretilen oğul bireylerin belirli bir kısmı yeni iterasyona geçişte çözüm kümesinden çıkarılır. Bu işlemin ardından yeni bir nesil ortaya çıkar. Bu işlemlerin sonlandırma kriteri (iterasyon sayısı veya süre) sağlanıncaya kadar devam ettirilmesi ile ele alınan probleme optimal veya optimale yakın çözümler üreten kromozomlar ortaya çıkar [59].

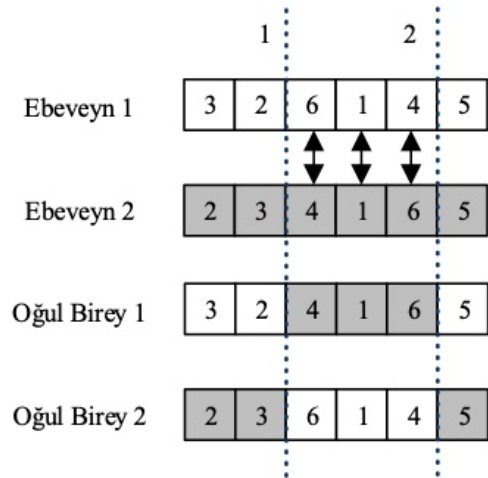
GA içerisindeki en önemli konulardan bir tanesi kromozom veya diğer adıyla çözüm gösterimidir. Literatürde çözüm gösterimi için ikili kodlama, permütasyon kodlama, ağaç kodlama ve değer kodlama gibi yaygın şekilde kullanılan kod gösterimleri bulunmaktadır. Bu çalışmada genellikle gezgin satıcı ve çizelgeleme (sıralama) problemleri gibi belirli bir sıranın oluşturulması hedeflenen problem türlerinde kullanılabilecek türde bir kromozom gösterimi olan ve Şekil 3'de gösterilen permütasyon kodlama kullanılmıştır. Bu kullanımda sütunlar müşteri numarasını, değerler ise müşteri ziyaret sırasını göstermektedir [60].

Kromozom 1	1	3	4	2	6	5	8	10	9	7
Kromozom 2	10	4	5	9	2	8	1	7	3	6

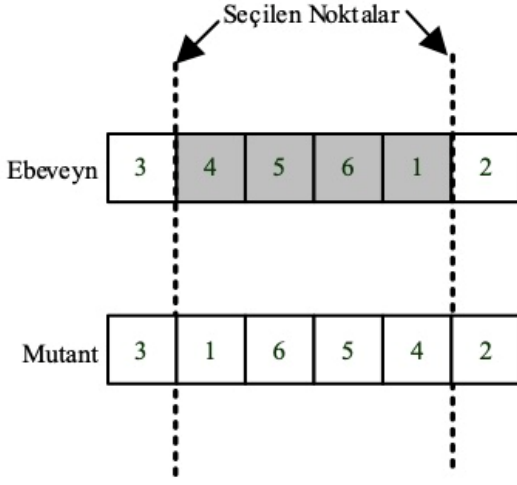
Şekil 3. Permütasyon kodlama ile kromozom gösterimi (Representation of the permutation encoding)

Genetik algoritma çözüm performansına etki eden diğer önemli konu yeni çözümlerin üretimi için kullanılan operatörlerdir. Bu operatörler çaprazlama ve mutasyon operatörleridir. Genetik algoritmada eşleştirme havuzundan seçilen kromozomların birbiri ile

çiftleştirilmesi sonucunda oğul bireylerin (yeni çözümlerin) oluştuğu süreç çaprazlama sürecidir. Arama prosesinde uygulanan çaprazlamanın amacı, farklı noktalarda bulunan çözümlere ait kromozomların belirli bölümlerinin karşılıklı olarak yer değiştirilmesi suretiyle aramayı daha önce ziyaret edilmeyen benzer bölgelere taşımaktır [60]. Literatürde çaprazlama için tek nokta, çift nokta, çok nokta ve kısmi ilişkilendirilmiş (PMX) çaprazlama gibi çaprazlama türleri bulunmaktadır. Genetik algoritma çözüm sürecindeki en iyi çözümün aranması sırasında bir adım sonraki çözüm arama alanının uzağında çok daha iyi veya kötü bir çözümler mutasyon operatörü sayesinde denir [61]. Kromozom gösterimine bağlı olarak bit değiştirme (bitwise), uniform, iki nokta değiş tokuş (swap), ters çevirme (inversion) gibi farklı mutasyon yöntemleri literatürde yaygın olarak kullanılan mutasyon yöntemleridir [60]. Bu çalışmada; çaprazlama yöntemi olarak iki nokta çaprazlama (Şekil 4), mutasyon yöntemi olarak da ters çevirme yöntemi (Şekil 5) kullanılarak yeniden üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; çaprazlama yöntemi kullanıldıktan sonra yeni bireyler oluştuğu için bu bireylerin uygun aday çözümü ifade etmeme ihtimalleri vardır. Bu durumun üstesinden gelmek için çalışmada, ceza fonksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, oluşan yeni bireylerin uygunluk durumları kontrol edilmekte, uygun olmayan bireyler için uygunluk fonksiyonu içerisine ceza maliyeti de eklenmektedir. Böylece uygun olmayan bireylerin uygunluk fonksiyon değerleri yüksek olmaktadır. Uygulanan problem ise bir enküçükleme problemi olması nedeni ile uygunluk değeri yüksek olan bireyler elenmektedir.



Şekil 4. Çaprazlama (Crossover)



Şekil 5. Ters çevirme mutasyon yöntemi (Scramble mutation method)

Çalışma kapsamında genetik algoritmanın başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuştur. Uygunluk fonksiyonu için matematiksel modelde ifade edilen karbon emisyon maliyeti, yol maliyeti ve gecikme maliyeti olmak üzere üç bileşenden oluşan amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Eşleme havuzuna alınacak bireyler rulet çemberi yöntemiyle seçilmiş, durdurma kriteri olarak da iterasyon sayısı kullanılmıştır. Uygulanan genetik algoritma temel adımları Tablo 3’de ifade edilmiştir.

5. Deneysel Çalışma (Experimental study)

Uygulama aşamasında, matematiksel modelin ve metasezgisel yaklaşımların sonuçlarının analiz edilebilmesi için gerekli olan sayısal testler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, kullanılan test problemleri ve yöntemlere ait parametre değerleri tanımlandıktan sonra gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen çözüm sonuçları sunulmuştur. Metasezgisel algoritmalar PYTHON programlama dilinde kodlanmış, deneyler Intel Core i5, 2GHz, 16 GB RAM’e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

5.1. Test Problemleri (Test problems)

Sayısal deneylerde kullanılacak test problemleri oluşturulurken ZPARP için Solomon [63] test problemlerinin (R101, R102, R103, R104 ve R105) veri yapısı kullanılmıştır. Bu problemlerden, müşteri dağıtım talepleri, lokasyonları, zaman pencereleri, servis süreleri ve araç kapasiteleri gibi bilgiler derlenmiştir. Ardından, EZTDARP ile ilgili müşteri toplama talep verileri ise Dethloff [64] tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir. Bu çalışmadan yalnızca ilgili talep verileri alınmıştır. Karbon emisyonu maliyetinin hesaplamasında Chen vd., [51]’de yer alan parametre değerleri kullanılmıştır. Buna göre; yüksüz araç için birim mesafe başına tüketilen yakıt miktarı 2

birim, yüklü araç için birim mesafe başına ek yakıt tüketimi 0,8 birim olarak belirlenmiştir. Ayrıca müşteriler arasındaki mesafenin belirlenmesi için kullanılan hız faktörü 40 km/s olarak tanımlanmıştır. Kullanılan veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 4’de gösterilmiştir. Buna göre veri setleri, müşteri sayılarına göre boyutlandırılmış ve problemler küçük, orta ve büyük boyutlu olmak üzere 3 grupta toplanmıştır. Gruplanan bu boyutlar içerisinde 5 ayrı veri seti kullanılmış ve müşteri sayıları farklılaştırılmıştır.

Tablo 4. Veri setleri (Data set)

Veri seti	Boyut	Müşteri sayısı
DS1	Küçük	5
DS2		6
DS3		7
DS4		8
DS5		9
DS6	Orta	15
DS7		20
DS8		25
DS9		30
DS10		35
DS11	Büyük	60
DS12		70
DS13		80
DS14		90
DS15		100

ASÇA’nın maksimum iterasyon sayısı, her bir iterasyondaki yapay ajan sayısı, başlangıç adım uzunluğu, çözümlere verilen ağırlıkların belirlenmesinde kullanılan τ parametresi ve adım uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan kullanıcı tanımlı φ ve λ parametrelerine verilen değerler Tablo 5’te gösterilmiştir. Bu parametreler algoritma başlangıcında belirlenmektedir. Buna göre, maksimum iterasyon sayısı, algoritmanın kaç iterasyon çalıştırılacağını ifade etmektedir. Her bir iterasyondaki yapay ajan sayısı, popülasyon sayısını temsil etmektedir. τ parametresi süperpozisyon belirleme esnasında kullanılmaktadır ve ajanların ağırlık tanımlama parametrelerini belirtmektedir. λ ve φ parametreleri, sırasıyla, adım boyutunun değiştirilmesini ve adım uzunluğu boyutunun oranının belirlenmesi için kullanılan parametrelerdir ve Levy Flight mekanizması içerisinde kullanılmaktadır. Başlangıç adım uzunluğu ise ilk hareket mekanizmasında kullanılacak olan adım uzunluğunu belirtmektedir.

Tablo 5. ASÇA’nın parametre değerleri
(The parameter value of ASÇA)

Parametre	Tanım	Değer
$Maxiter$	Maksimum iterasyon sayısı	5000
AA	Her bir iterasyondaki yapay ajan sayısı	100
τ	Kullanıcı tanımlı parametre	0,3
λ	Kullanıcı tanımlı parametre	0,75
φ	Kullanıcı tanımlı parametre	0,001
sl_0	Başlangıç adım uzunluğu	0,005

Tablo 3. Genetik algoritma temel adımları (The main steps of the genetic algorithm)

Adım	Açıklama
0	Algoritmanın parametre değerlerini gir.
1	Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluştur.
2	Popülasyondaki bireylerin uygunluk fonksiyonu değerlerini hesapla.
3	Rulet çemberi yöntemine göre eşleştirme havuzunu oluştur.
4	Eşleştirme havuzuna yeniden üretim operatörleri olan çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile yeni bireyleri oluştur.
5	Durdurma kriterini kontrol et; eğer durdurma kriteri sağlanıyorsa algoritmayı sonlandır, en iyi amaç fonksiyonu değerini raporla, aksi takdirde $iterasyon\ sayısı = iterasyon\ sayısı + 1$; Adım 2’ye geç.

GA ile çözüm için çaprazlama oranı, mutasyon oranı, popülasyon büyüklüğü ve nesil sayısı olmak üzere bazı parametre değerleri tanımlanmalıdır. Bu parametrelerin almış oldukları değerler çözüm kalitesini etkileyebileceği için problemin çözümü için önemli bir faktördür. Parametreler için uygun değerler literatürdeki bazı çalışmalarda belirtilmiştir [65, 66, 67]. Bu çalışmada ilgili parametreler için Tablo 6'da gösterilen değerler kullanılmıştır. Bu parametreler algoritma başlangıcında belirlenmektedir. Buna göre, popülasyon büyüklüğü, algoritmanın popülasyonundaki birey sayısını ifade etmektedir. Çaprazlama yöntemi ve oranı, sırasıyla, çaprazlama operatörünün hangi yöneme göre uygulanacağını ve hangi oranda çaprazlama kullanılacağını göstermektedir. Aile seçim yöntemi, eşleşme havuzunun oluşturulma biçimini göstermektedir. Mutasyon yöntemi ve oranı, sırasıyla, mutasyon operatörü içerisinde kullanılacak olan yöntemi ve bu operatörün kullanılma oranını ifade etmektedir. İterasyon sayısı ise algoritmanın kaç iterasyon olarak kullanılacağını ifade etmektedir ve bu uygulama içerisinde durdurma kriteri olarak kullanılmıştır.

5.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışma kapsamında ele alınan ZPETDYARP, öncelikle ticari bir optimizasyon yazılımı olan CPLEX çözücüsü kullanılmış ve sistem ilgili çözümlerin alınması için 180 dakika olarak sınırlandırılmıştır. Böylelikle küçük boyutlu veri setleri için CPLEX ile çözüme ulaşılabilirken, orta ve büyük boyutlu veri setleri için ilgili sürede bir çözüme ulaşamamıştır. Bu yüzden; ele alınan ZPETDYARP, dördüncü bölümde özetlenen ASÇA ve GA yöntemleri ile de

çözülmüştür. Ayrıca, ASÇA içerisine tur geliştirici sezgiseller olan 2-opt ve or-opt sezgiselleri dahil edilerek çözüm kalitesindeki değişimler de incelenmiştir. Çalışma içerisinde ilgili deneyler için 10 tekrar yapılmış ve amaç fonksiyonu değerleri ile çözüm süreleri kaydedilmiştir. Elde edilen en iyi ve en kötü çözüm değerleri, çözüm süreleri ve ilgili değerlendirme kriteri için elde edilen en iyi değerden sapma miktarı Tablo 7'de gösterilmiştir. Literatürde bütünlük ZPETDYARP'nin kıyaslanabileceği bir çalışma bulunmadığı için ASÇA'nın çözüm performansı sadece GA ve CPLEX sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Tablo 6. GA'nın parametre değerleri (The parameter value of GA)

Parametre	Değer
Popülasyon Büyüklüğü	100
Çaprazlama Yöntemi	İki nokta çaprazlama
Çaprazlama Oranı	0,5
Aile Seçim Yöntemi	Rulet çemberi
Mutasyon Yöntemi	Ters çevirme
Mutasyon Oranı	0,01
İterasyon sayısı	400

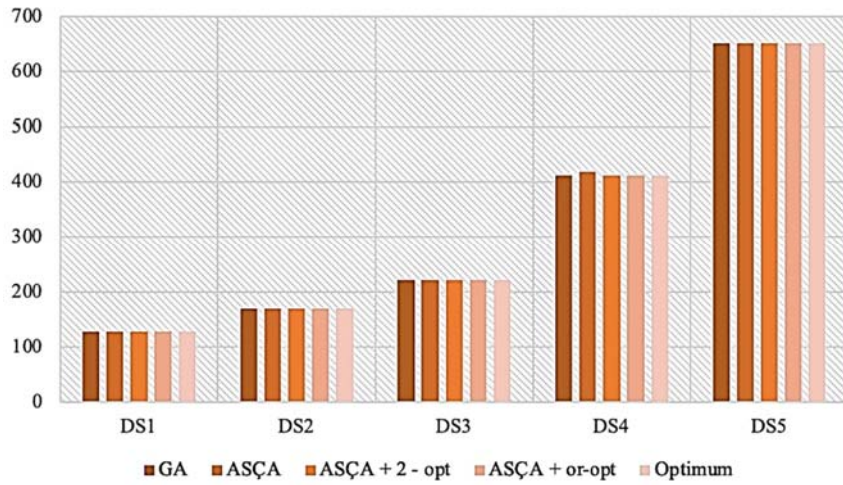
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde küçük veri setleri (DS1-DS5) için 4 algoritmanın da aynı uygunluk değerine sahip çözümleri elde edilebildiği görülmektedir. Ancak müşteri sayısının artması ile birlikte algoritmaların sonuçları arasında az da olsa farklılıklar oluşmaktadır. Tablo 5'te yer alan çözüm değerleri küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Deney sonuçları (The results of experiment)

Veri Seti	Değerlendirme Kriteri	GA		WSA		WSA + 2-opt		WSA-or-opt		Kesin Çözüm	
		Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma
DS1	Ortalama sonuç	128	0	128	0	128	0	128	0	128	0
	Çözüm süresi (sn)	2,22	22,2	2,7	27	2,51	25,1	3,04	30,4	0,1	0
	En iyi	128	0	128	0	128	0	128	0	128	0
	En kötü	128	0	128	0	128	0	128	0	128	0
DS2	Ortalama sonuç	170	0	170	0	170	0	170	0	170	0
	Çözüm süresi (sn)	2,38	11,9	2,63	13,15	2,77	13,85	3,05	15,25	0,2	0
	En iyi	170	0	170	0	170	0	170	0	170	0
	En kötü	170	0	170	0	170	0	170	0	170	0
DS3	Ortalama sonuç	222	0	225	1,35	225	1,35	223	0,45	221	0
	Çözüm süresi (sn)	2,49	12,45	2,81	14,05	2,94	14,7	3,18	15,9	0,2	0
	En iyi	221	0	221	0	221	0	221	0	221	0
	En kötü	224	0	228	1,79	228	1,79	228	1,79	221	0
DS4	Ortalama sonuç	415	0	434	4,58	428	3,13	417	0,48	412	0
	Çözüm süresi (sn)	2,52	2,8	2,9	3,22	3,11	3,45	3,29	3,65	0,9	0
	En iyi	412	0	418	1,46	412	0	412	0	412	0
	En kötü	420	0	440	4,76	434	3,33	428	1,90	412	-
DS5	Ortalama sonuç	654	0	660	0,92	656	0,31	654	0	651	-
	Çözüm süresi (sn)	2,76	0	2,94	15,08	3,2	15,94	3,39	22,83	4	1,44
	En iyi	651	0	651	0	651	0	651	0	651	-
	En kötü	659	0	668	1,37	668	1,37	668	1,37	651	-
DS6	Ortalama sonuç	8099	0	8168	0,85	8152	0,65	8100	0,01	-	-
	Çözüm süresi (sn)	4,46	0	6,21	6,52	7,9	77,13	8,75	96,18	-	-
	En iyi	8020	0	8135	1,43	8020	0	8020	0	-	-
	En kötü	8228	1,02	8160	0,18	8160	0,18	8145	0	-	-
DS7	Ortalama sonuç	13469	0	13860	2,90	13615	1,08	13525	0,42	-	-
	Çözüm süresi (sn)	7,27	0	8,16	39,24	9,33	28,34	11,6	59,56	-	-
	En iyi	13192	0,14	13256	0,50	13240	0,50	13174	0	-	-
	En kötü	13778	0,69	14262	2,11	13972	2,11	13683	0	-	-

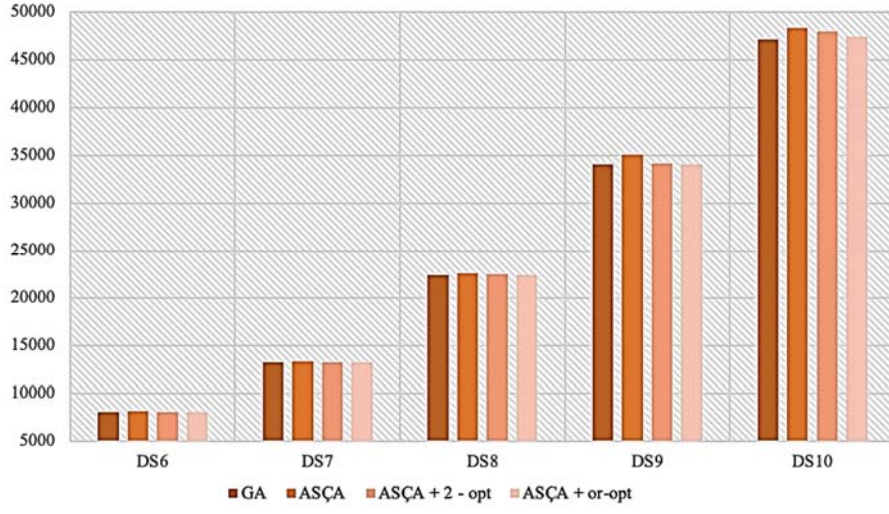
Tablo 7. Deney sonuçları (The results of experiment)

Veri Seti	Değerlendirme Kriteri	GA		WSA		WSA + 2-opt		WSA-or-opt		Kesin Çözüm	
		Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma	Değer	Sapma
DS8	Ortalama sonuç	22802	0	22936	0,59	22879	0,34	22814	0,05	-	-
	Çözüm süresi (sn)	11,43	0	13,52	12,24	15,29	33,77	17,81	8,75	-	-
	En iyi	22359	0	22583	1,00	22480	0,54	22374	0,07	-	-
	En kötü	23145	2,27	23619	4,37	22631	0	22841	0,93	-	-
DS9	Ortalama sonuç	34566	0	35528	2,78	35025	1,33	34704	0,40	-	-
	Çözüm süresi (sn)	17,18	0	19,43	18,29	21,8	26,89	25,71	8,75	-	-
	En iyi	34027	0	35062	3,04	34154	0,37	34074	0,14	-	-
	En kötü	34938	0	36289	3,87	36004	3,05	35718	2,23	-	-
DS10	Ortalama sonuç	47750	0	48927	2,46	48271	1,09	47803	0,11	-	-
	Çözüm süresi (sn)	24,59	0	28,6	13,10	30,54	24,20	34,93	8,75	-	-
	En iyi	47125	0	48267	2,42	47893	1,63	47360	0,50	-	-
	En kötü	48152	0	50271	4,40	49672	3,16	48600	0,93	-	-
DS11	Ortalama sonuç	159613	0	166829	4,52	162857	2,03	160825	0,76	-	-
	Çözüm süresi (sn)	133	0	150	16,31	157	18,05	165	8,75	-	-
	En iyi	158884	0	164729	3,68	162540	2,30	160050	0,73	-	-
	En kötü	160308	0	179275	11,83	172948	7,88	168285	4,98	-	-
DS12	Ortalama sonuç	220523	0	223742	1,46	223958	1,56	221246	0,33	-	-
	Çözüm süresi (sn)	213	0	220	3,29	224	5,16	248	8,75	-	-
	En iyi	217776	0	220736	1,36	219736	0,90	218635	0,39	-	-
	En kötü	221985	0	228364	2,87	224382	1,08	222637	0,29	-	-
DS13	Ortalama sonuç	277620	0	286374	3,15	278374	0,27	278372	0,27	-	-
	Çözüm süresi (sn)	292	0	304	3,29	315	7,88	327	8,75	-	-
	En iyi	274973	0,41	275968	0,93	276382	0,93	273848	0	-	-
	En kötü	279321	0,34	294757	0,73	280425	0,73	278386	0	-	-
DS14	Ortalama sonuç	338908	0,48	369375	8,32	365325	8,32	337273	0	-	-
	Çözüm süresi (sn)	422	0	431	4,11	448	6,16	465	8,75	-	-
	En iyi	333798	0	366847	9,90	338573	1,43	334731	0,28	-	-
	En kötü	340547	0	376823	10,65	360475	5,85	341548	0,29	-	-
DS15	Ortalama sonuç	416492	0	440276	5,71	426747	2,46	417469	0,23	-	-
	Çözüm süresi (sn)	549	0	565	2,13	580	5,65	612	8,75	-	-
	En iyi	412005	0	436317	5,90	425583	3,30	419475	1,81	-	-
	En kötü	418944	0	445822	6,42	425114	1,47	420560	0,39	-	-

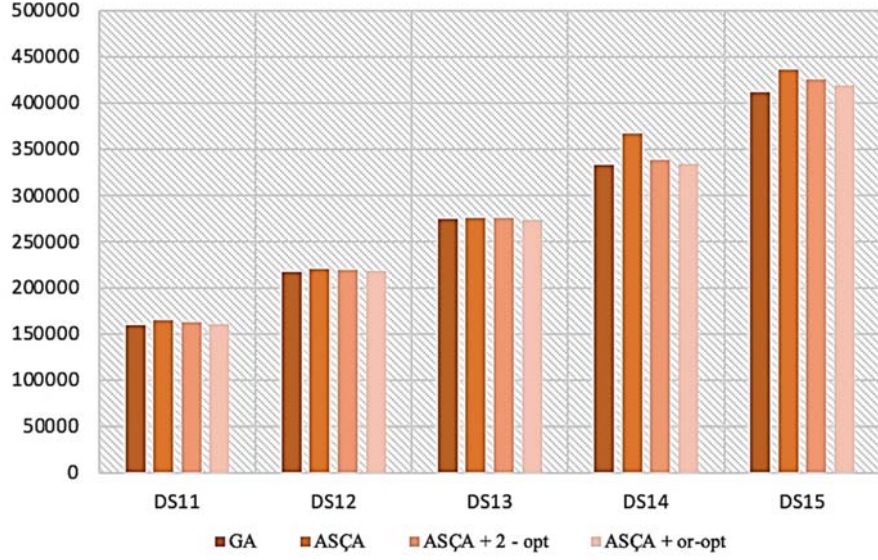
**Şekil 7.** Küçük boyutlu veri setleri için uygunluk değerleri (The fitness function of the small data set)

Algoritmalar ile ilgili bir diğer karşılaştırma çözüm süreleri için yapılabilir. Bütün veri setleri için GA en iyi çözüm süresi değerlerini

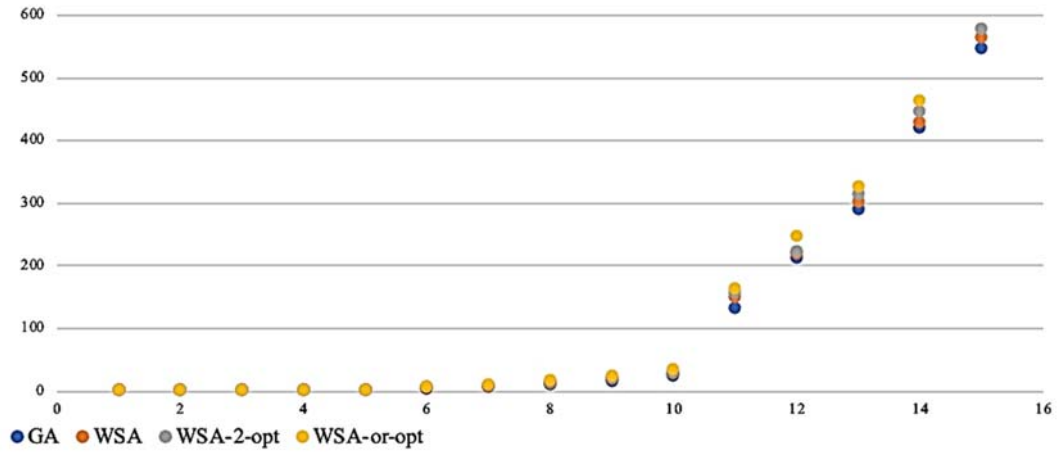
sağlamakla beraber ASÇA ve varyantlarının da ele alınan probleme hızlı çözümler üretebildiği Şekil 10'da belirtildiği gibi görülmektedir.



Şekil 8. Orta boyutlu veri setleri için uygunluk değerleri (The fitness function of the medium data set)



Şekil 9. Büyük boyutlu veri setleri için uygunluk değerleri (The fitness function of the large data set)



Şekil 10. Veri setleri için çözüm süreleri (The solution time of data sets)

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, son yıllarda gerek araştırmacıların gerekse uygulayıcıların üzerinde yoğun olarak çalıştıkları sürdürülebilirliğin temel konularından olan yeşil araç rotalama problemi, zaman pencereli araç rotalama ve eş zamanlı topla dağıtım araç rotalama problemleri ile bütünleşik olarak ele alınmıştır. Bütünleşik problem yapısal olarak oluşturulduktan sonra karma tamsayı doğrusal olmayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çözüm aşamasında, yapılan doğrusallaştırma işleminin yardımıyla problemin matematiksel modeli doğrusal tam sayılı programlama modeline dönüştürülmüştür. ARP'nin yeni kısıtlamalar eklenmesiyle ortaya çıkan birer varyantı olan YARP, ZPARP ve ETDARP NP-Zor sınıfında yer alan problemlerdir. Bu özellikleri nedeniyle polinom zamanda kesin çözüm yöntemleri ile çözümü oldukça zordur ve genellikle çözümlerinde sezgisel ve metasezgisel yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında ortaya konan bütünleşik problem için popülasyon tabanlı klasik bir optimizasyon yöntemi olan GA ve nispeten yeni bir yöntem olan ASÇA yöntemleri çözüm yöntemi olarak kullanılmıştır. Elde edilen çözümler GA'nın uygunluk değeri ve çözüm süresi bakımından daha iyi sonuçlar sağladığını göstermektedir. Diğer taraftan rota geliştirici Or-opt yönteminin ASÇA ile birlikte kullanımı GA'ya yakın çözümler sağlamıştır.

Çalışmanın literatüre en önemli katkısı problemin tanımlanması için geliştirilen ve doğrusallaştırma işlemi ile doğrusal hale getirilene kadar tam sayılı doğrusal olmayan programlama modelidir. Bu modelde, teslimatlarla ilgili gecikmelerin maliyet fonksiyonuna eklenmesinin yanı sıra dağıtım ve toplama talepleri de deterministik olarak modele ilave edilmiştir. Ortaya konan yeni modelin klasik bir optimizasyon yöntemi olan GA'nın yanı sıra yeni bir optimizasyon algoritması olan ASÇA ve türevleri ile çözülmesi de literatüre bir katkı olarak düşünülebilir. Deneysel çalışmalar için hazırlanan veri setleri, sonraki araştırmalar için kıyaslanabilir bir nitelikte oluşturulmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, önerilen algoritmalara farklı sezgisel algoritmalar eklenerek veya farklı sezgisel / metasezgisel algoritmalar kullanılarak yeni çözüm yaklaşımları geliştirilebilir. Yine gelecek çalışmalarda, matematiksel modelde yapılacak modifikasyonlar ile sürdürülebilirliğin farklı yapıları ve farklı araç filosu seçeneklerinin (heterojen, karma) olması durumları için de yeni matematiksel modeller ortaya konabilir.

Kaynaklar (References)

- Li, J., Wang, D., Zhang, J., Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions, *J. Clean. Prod.*, 201, 896-908, 2018.
- Karagül, K., Sahin, Y., Aydemir, E., Oral, A. A simulated annealing algorithm based solution method for a green vehicle routing problem with fuel consumption, *Lean and Green Supply Chain Management. International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, Editör: Paksoy, T., Weber, G.W., Huber, S., Springer Nature Switzerland, Cham, Switzerland, 273, 161-187, 2019.
- Zhou, Y., Sheu, J.B., Wang, J., Robustness assessment of urban road network with consideration of multiple hazard events, *Risk Anal.*, 37 (3), 1477-1494, 2017.
- Zhang, W., Gajpal, Y., Appadoo, S., Wei, Q., Multi-depot green vehicle routing problem to minimize carbon emissions. *Sustainability*, 12 (8), 3500, 2020.
- Tokat, S., Karagül, K., Sahin, Y., Aydemir, E., Fuzzy c-means clustering-based key performance indicator design for warehouse loading operations, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, 34 (8), 6377-6384, 2022.
- Waters, D., *Logistics: An Introduction to Supply Chain Management*, Palgrave Macmillan, Basingstoke, England, 2003.
- Kay, M. G., Karagül, K., Sahin, Y., Gunduz, G., Minimizing Total Logistics Cost for Long-Haul Multi-Stop Truck Transportation. *Transp. Res. Rec.*, 2676 (2), 367-378, 2022.
- Dayioğlu, E. G., Karagül, K., Şahin, Y., Kay, M. G. Route planning methods for a modular warehouse system, *Int. J. Optim. Control: Theor. Appl.*, 10 (1), 17-25, 2020.
- Karagül, K., Güngör, İ., A case study of heterogeneous fleet vehicle routing problem: Touristic distribution application in Alanya, *Int. J. Optim. Control: Theor. Appl.*, 4 (2), 67-76, 2014.
- Aydemir, E., & Karagül, K., Solving a periodic capacitated vehicle routing problem using simulated annealing algorithm for a manufacturing company. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17 (1), 1-13, 2020.
- Zhang, M., Pratap, S., Zhao, Z., Prajapati, D., Huang, G.Q., Forward and reverse logistics vehicle routing problems with time horizons in B2C e-commerce logistics, *Int. J. Prod. Res.*, 59 (20), 6291-6310, 2021.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., *Modelling and optimization of vehicle routing problems*, Handbook on Modelling for Discrete Optimization, Cilt 1, Appa G., Pitsoulis, L., Williams, H.P., Springer, New York, A.B.D., 151-181, 2006.
- Şahin, Y., Eroğlu, A., Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi İçin Metasezgisel Yöntemler: Bilimsel Yazın Taraması. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dersi, 19 (4), 337-355, 2014.
- Aydemir, E., Karagül, K., Tokat, S., Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemlerinde Başlangıç Rotalarının Kurulması İçin Yeni Bir Algoritma, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4 (3), 215-226, 2016.
- Belgin Ö., Karaoğlan İ., Altıparmak F., Mathematical programming based heuristic approach for two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1565-1580, 2021.
- Marinakos, Y., Marinaki, M., Migdalas, A., A multi-adaptive particle swarm optimization for the vehicle routing problem with time Windows, *Information Sciences*, 481, 311-329, 2019.
- Dantzig, G.B., Ramser, J.H., The truck dispatching problem, *Management science*, 6 (1), 80-91, 1959.
- Çetin S., Gencer C., Vehicle Routing Problems with Hard Time Windows And Simultaneous Pick Up And Delivery: A Mathematical Model, *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 579-585, 2010.
- Clarke, G., Wright, J.W., Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations research*, 12 (4), 568-581, 1964.
- Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., State space relaxation procedures for the computation of bounds to routing problems, *Networks*, 11, 145-164, 1981.
- Christofides, N., Vehicle scheduling and routing. Paper presented in 12th International Symposium on Mathematical Programming, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1985.
- Fisher, M. L., Optimal Solution of Vehicle Routing Problems Using Minimum K-trees, *Operations Research*, 42, 626-642, 1994.
- Miller, D. L., A matching based algorithm for capacitated vehicle routing problems, *ORSA Journal on Computing*, 7 (1), 1-9, 1995.
- Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., Poggi de Aragao, M., Reis, M., Uchoa, E., Werneck, R. F., Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem, *Mathematical Programming*, 106, 491-511, 2006.
- Baldacci, R., Christofides, N., & Mingozzi, A., An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts, *Mathematical Programming*, 115 (2), 351-385, 2008.
- Hadjiconstantinou, E., Christofides, N., An exact algorithm for general, orthogonal, two-dimensional knapsack problems, *European Journal of Operational Research*, 83 (1), 39-56, 1995.
- Bramel, J., Simchi-Levi, D., Set-Covering-Based Algorithms for the Capacitated VRP. In P. Toth & D. Vigo (Eds.), *The Vehicle Routing Problem*, Philadelphia: SIAM, 85-108, 2002.
- Erdoğan, S., Miller-Hooks, E., A green vehicle routing problem, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48 (1), 100-114, 2012
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., A review of recent research on green road freight transportation. *European journal of operational research*, 237 (3), 775-793, 2014.
- Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6 (5), 347-357, 2011.

31. Bektaş, T., Laporte, G., The pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45 (8), 1232-1250, 2011.
32. Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G., An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem, *European journal of operational research*, 223 (2), 346-359, 2012.
33. Schneider, M., Stenger, A., Goeke, D., The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations, *Transportation science*, 48 (4), 500-520, 2014.
34. Lin, C., Choy, K. L., Ho, G.T., Ng, T.W., A genetic algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations, *Expert systems with applications*, 41 (7), 3284-3296, 2014.
35. Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S. M., Yaghoubi, S., Jokar, A., Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time Windows, *RAIRO-operations research*, 51 (4), 1151-1176, 2017.
36. Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S.M., Ignatius, J., Adaptive large neighborhood search heuristic for pollution-routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Soft Computing*, 22 (9), 2851-2865, 2018.
37. Madankumar, S., Rajendran, C., Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain, *Computers & Operations Research*, 89, 183-192, 2018.
38. Yu, Y., Wang, S., Wang, J., Huang, M., A branch-and-price algorithm for the heterogeneous fleet green vehicle routing problem with time Windows, *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 511-527, 2019.
39. Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Mutlu, F., A model for capacitated green vehicle routing problem with the time-varying vehicle speed and soft time Windows, *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106011, 2019.
40. Li, Y., Soleimani, H., Zohal, M., An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives. *Journal of cleaner production*, 227, 1161-1172, 2019.
41. Macrina, G., Pugliese, L.D.P., Guerriero, F., Laporte, G., The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time Windows, *Computers & Operations Research*, 101, 183-199, 2019.
42. Yu, Z., Zhang, P., Yu, Y., Sun, w., Huang, M., An Adaptive Large Neighborhood Search for the Larger-Scale Instances of Green Vehicle Routing Problem with Time Windows, *Complexity*, 14 pages, 2020.
43. Utama, D. M., Fitria, T.A., Garside, A.K., Artificial bee colony algorithm for solving green vehicle routing problems with time windows. *Journal of Physics: Conference Series*, 1933 (1), 012043, 2021.
44. Dengiz A.Ö., Atalay K., Altıparmak F., A goal programming approach for multi objective, multi-trips and time window routing problem in home health care service, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2167-2182, 2021.
45. Sadat Hosseini Khajouei, M. H., Pilevari, N., Developing an environmental vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and a discrete invasive weed optimization approach, *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 8 (1), 202-217, 2021.
46. Fakhrazad, M., Hoseini Shorshani, S., Hosseini Nasab, H., Mostafaeipour, A., Developing a green vehicle routing problem model with time windows and simultaneous pickup and delivery under demand uncertainty: Minimizing fuel consumption, *Int. J. Nonlinear Anal. Appl.*, (In Press), doi: 10.22075/ijnaa.2021.23209.2493, 2022.
47. Prajapati, D., Chan, F.T., Daultani, Y., Pratap, S., Sustainable vehicle routing of agro-food grains in the e-commerce industry. *International Journal of Production Research*, 1-26, 2022.
48. Toth, P., Vigo, D., An overview of vehicle routing problems. Toth, P., & Vigo, D. (Ed.), *The Vehicle Routing Problem* içinde, Philadelphia: SIAM, 1-26, 2002.
49. Laporte G., The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operational Research*, 59, 345 – 358, 1992.
50. Keçeci, B., Altıparmak, F., Kara, İ., Heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical formulations and a heuristic algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 185-195, 2015.
51. Chen, G., Wu, X., Li, J., Guo, H., Green vehicle routing and scheduling optimization of ship steel distribution center based on improved intelligent water drop algorithms, *Math. Probl. Eng.*, 2020, 13 pages, 2020.
52. Yağmur, E., Kesen, S.E., Multi-trip heterogeneous vehicle routing problem coordinated with production scheduling: Memetic algorithm and simulated annealing approaches, *Comput Ind Eng.*, 161, 107649, 2021.
53. Baykasoğlu, A., Akpınar, Ş., Weighted superposition attraction (WSA): a swarm intelligence algorithm for optimization problems–part 2: constrained optimization, *Appl. Soft Comput.*, 37 (2015), 396-415, 2015.
54. Holland, John H (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 207s.
55. Baykasoğlu, A., Akpınar, Ş., Weighted superposition attraction (WSA): a swarm intelligence algorithm for optimization problems– part 1: Unconstrained optimization, *Appl. Soft Comput.*, 56 (2017), 520-540, 2017.
56. Baykasoğlu, A., Ozsoydan, F.B., Dynamic optimization in binary search spaces via weighted superposition attraction algorithm, *Expert Syst. Appl.*, 96, 157-174, 2018.
57. Baykasoğlu, A., Ozsoydan, F.B., Senol, M.E., Weighted superposition attraction algorithm for binary optimization problems, *Operational Research*, 20 (4), 2555-2581, 2020.
58. Baykasoğlu, A., Şenol, M.E., Weighted superposition attraction algorithm for combinatorial optimization, *Expert Syst. Appl.*, 138 (2019), 112792, 2019.
59. Gen, M., Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Amerika Birleşik Devletleri, John Wiley & Sons, Inc. 1997.
60. Şahin, Y., & Kulak, O. Depo Operasyonlarının Planlanması İçin Genetik Algoritma Esaslı Modeller. *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 5 (3), 141-153, 2013.
61. Şahin Y. Depo Operasyonları ve Sipariş Dağıtım Faaliyetlerinin Sezgisel Yöntemler Kullanarak Eş Zamanlı Optimizasyonu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2014.
62. Şen, Z., *Genetik Algoritmalar ve En İyileme Yöntemleri*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 2004.
63. Solomon, M. M., Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35 (2), 254-265, 1987.
64. Dethloff, J. Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR-Spektrum*, 23 (1), 79-96, 2001.
65. Prins, C., A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & operations research*, 31 (12), 1985-2002, 2004.
66. Talbi, E. G. *Metaheuristics: from design to implementation*, John Wiley & Sons, 74, 2009.
67. Rylander, S.G.B., Gotshall, B., Optimal population size and the genetic algorithm. *Population*, 100 (400), 900, 2002.