



Çok kompartımanlı heterojen filolu zaman pencerele araç rotalama probleminin çözümü için sezgisel algoritmalar

Heuristic algorithms for solving the multi-compartment vehicle routing problem with time windows and heterogeneous fleet

Duygu TOPALOĞLU^{1*}, Olcay POLAT², Can Berk KALAYCI²

¹Lojistik Bölümü, Honaz Meslek Yüksekokulu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.

dtopaloglu@pau.edu.tr

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.

opolat@pau.edu.tr, cbkalayci@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.02.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 01.09.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.50280

Kabul Tarihi/Accepted: 05.09.2023

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Aynı kompartımanda taşınmayan farklı ürünlerin dağıtımında çok kompartımanlı araç kullanımı verimli bir çözüm yöntemidir. Bu çalışmada zaman pencerele araç rotalama problemi heterojen filolu ve çok kompartımanlı araçların kullanımı göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. Çalışmada ele alınan problemin varyantı heterojen filolu çok kompartımanlı zaman pencerele araç rotalama problemi (HFÇKZPARP) olarak bilinmektedir. Bu çalışmada Değişken Komşuluk Arama algoritması (DKA) ve Yapay Arı Koloni Algoritması (YAKA) problemin çözümü için uyarlanmıştır. Algoritmaların performanslarını analiz edebilmek için iyi bilinen veri setleri problem yapısına uyarlanmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar geliştirilen algoritmaların oluşturulan veri setlerini efektif bir şekilde çözdüğünü ortaya koymaktadır. DKA algoritması YAKA'ya göre sayısal olarak önemli bir üstünlük gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Lojistik, Rotalama, Bölünebilir talep, Çok kompartıman, Zaman penceresi, Sezgisel algoritma.

Abstract

The use of multi-compartment vehicles is an efficient solution for distributing different products that cannot be transported in the same compartment. In this study, the vehicle routing problem with time windows is addressed by considering the use of a heterogeneous fleet and multi-compartment vehicles. The variant of the problem discussed in this study is known as the Heterogeneous Fleet Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MCRPTWHF). In this study, the Variable Neighborhood Search algorithm (VNS) and the Artificial Bee Colony Algorithm (ABCA) have been adapted to solve the problem. Well-known datasets have been adapted to fit the problem structure in order to analyze the performance of the algorithms. Comparative results reveal that the developed algorithms effectively solve the generated datasets. It has been observed that the DKA algorithm has significant numerical superiority compared to YAKA.

Keywords: Logistics, Routing, Split delivery, Multi-compartment, Time window, Heuristic algorithms.

1 Giriş

Artan ürün çeşitliliği, ürünlerin taşınmasında gerekli olan koşulların farklılıkları, müşterilerin özel kısıtlamaları ve benzeri nedenler ile pratik hayatta çok kompartımanlı araçların kullanımı yaygınlaşarak süt toplama, akaryakıt dağıtım, canlı hayvan taşımacılığı gibi birçok örneği karşımıza çıkmaktadır. Bu karmaşık problemin teorik karşılığı olan araçların rotalama problemlerinin çözümü için çok kompartımanlı araç rotalama problemleri (ÇKARP) son yıllarda daha yaygın olarak literatürde çalışılmaya başlanmıştır.

ÇKARP çıkış noktası karakteristikleri birbirinden farklı ürünlerin aynı araçların farklı kompartımanlarına yerleştirilerek birbirine karıştırılmadan taşınabilmesini sağlamaktır.

Literatürde, ÇKARP problemlerinin çözümü için yapılmış olan çalışmalarda ele alınan temel varsayımlardan bir tanesi her üreticide her ürün grubundan bulunmasıdır. Ancak gerçek hayatta bu kuralın geçerli olamayacağı birçok senaryo bulunmaktadır. Serbest üretim ve alımın doğası gereği her talep merkezinin kendine ait farklı çeşitlerde ve miktarlarda

talebinin olması beklenen bir durumdur. Problem yapısına bu özelliğin dahil edilmesi ile ele alınan problem yapısı zorlaşmaktadır.

Klasik ÇKARP'de ele alınan temel varsayımlardan bir diğeri ise araçların homojen yapıda olması ve ürün çeşidi kadar kompartıman sayısı bulunmasıdır. Bu durum gerçek hayat koşullarında bu şekilde olmamaktadır. Üretici firmalar araç filolarını araç ihtiyaçlarını, saha koşullarını göz önüne alarak farklı zamanlarda değiştirmektedirler. Bu nedenle farklı zamanlarda alınan araçların tank kapasiteleri eşit olmayacağı gibi, farklı konumlara gönderilen araçlarda ilgili konumun gereksinimine uygun olarak seçileceği için tanker üzerinde bulunan tank sayıları da değişken olabilmektedir.

Ele alınan çalışmadan motivasyon kaynağı gerçek hayat problemlerinde karşımıza çıkan bu karmaşık yapının çözümü için bir matematiksel model önerisi ile problem çözümüne yönelik sezgisel bir yaklaşım geliştirilerek etkin bir metodolojinin ortaya konulmasıdır.

Belirtilen nedenler dikkate alınarak bu çalışmada klasik ÇKARP yapısından oldukça farklı olan Heterojen Filolu Zaman Pencerele Çok Kompartımanlı Araç Rotalama Problemi (HFÇKZPARP) bölünebilir talep koşulu problem yapısına dahil

*Yazışılan yazar/Corresponding author

edilerek ele alınmıştır. Ele alınan problem yapısının özellikleri şu şekildedir;

- Üreticilerde bulunan ürün sayıları birbirinden farklı olabilir,
- Araç filosu heterojen yapıda olabilir araçların kompartıman sayıları birbirinden farklı olabilir,
- Üreticilerin ürünleri bölünerek toplanabilir,
- Bir aracın bir kompartımanına yüklenen ürün tipleri aynı olmak şartı ile farklı üreticilerden toplanan ürünler eklenebilir,
- Ürün sayısı kompartıman sayısından fazla ya da az olabilir,
- Ürünler ile kompartımanlar aynı indisle gösterilemez. (Ürünün atanacağı kompartıman belirli değildir),
- Tam talep bölünmesine (Demand Split) izin verilir,
- Talep noktalarının belirli zaman dilimlerinde aktarma işlemine izin vermesi nedeni ile zaman penceresi kısıtı, ürünlerin bozulmasının önüne geçilebilmesi nedeni ile zaman limiti kısıtları problem yapısına dahil edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ÇKARP ile ilgili literatür taramasına, üçüncü bölümünde ilgili problemin çözümünde kullanılan matematiksel modele, dördüncü bölümünde ilgili problemin çözümü için tasarlanan Yapay Arı Koloni Algoritması (YAKA) ve bu algoritmanın tasarlanmasında kullanılan yöntemler, beşinci bölümde tasarlanan algoritmanın sınaması için oluşturulan veri seti ve ilgili algoritmanın literatür karşılaştırmaları, altıncı bölümde ise elde edilen sonuçlar ve gelecek araştırmalar için olası yollar sunulmuştur.

2 Literatür taraması

Araç rotalama problemleri (ARP) optimizasyon problemleri arasında oldukça sık çalışılan bir konu olmasına rağmen ÇKARP son yıllarda daha çok çalışılan bir konu haline gelmiştir. ÇKARP'nin ele alındığı ilk çalışmalar petrol ürünlerinin dağıtımı ile ilgili olmuştur. Bu çalışmaların akabinde ÇKARP atık toplama, süt toplama, market ürünleri dağıtımı, canlı hayvan dağıtımı problemlerinde de ele alınarak giderek daha sık çalışılan bir alan haline gelmiştir. Bahsedilen problem türlerinde ÇKARP'nin yapısı ilgili problem türü dikkate alınarak düzenlenmiştir.

Klasik ÇKARP yapısında ürün sayısı kompartıman sayısına eşit ve ürünlerin atanacakları kompartımanlar önceden belirli sabit olarak ele alınmıştır. İlgili yapıda her üretici her ürün tipine sahiptir ve kullanılan araçlar homojen yapıda eşit kompartıman sayısında ele alınmaktadır. Klasik ÇKARP yapısını ele alarak yapılan çalışmalarda kısmi talep bölünmesine izin verilmektedir, bir üreticinin farklı ürünleri farklı araçlara yüklenebilir ancak aynı ürün birden fazla araca yüklenemez kısıtlaması ya da bir üretici de bulunan ürün miktarı bir aracın kompartımanının kapasitesinden küçük olmalıdır şartı bulunmaktadır.

Literatürde klasik ÇKARP olarak tanımlanan versiyonun çözümü için çözümler geliştiren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda klasik ÇKARP yapısı korunarak ilgili problem yapısı farklı açılardan yeni kısıtlar eklenerek ele alınmıştır. Ancak gerçek hayat uygulamalarında

bulunan talep ve kısıtlar göz önüne alındığında klasik problem yapısını uygulamak ele alınan probleme etkin bir çözüm sunmayacaktır.

Ürün-kompartıman ataması sabit kompartıman boyutu sabit ÇKARP çalışmaları, Stokastik talep ele alan ÇKARP çalışmaları, Ürün-kompartıman ataması sabit, kompartıman boyutu Esnek ÇKARP çalışmaları ve Ürün-kompartıman ataması esnek Zengin ÇKARP çalışmaları aşağı alt bölümlerde verilerek ele alınan problemin karmaşık yapısı detaylıca sunulmuştur.

2.1 Ürün-kompartıman ataması sabit kompartıman boyutu sabit ÇKARP çalışmaları

Fallahi ve diğ. [1] Yapmış oldukları çalışmada ÇKARP probleminin çözümü için Memetik Algoritma (MA) ve Tabu Arama (TA) algoritmalarını kullanmışlardır. Literatürde bulunan klasik ARP veri setlerini geliştirmiş oldukları S₁ ve S₂ stratejileri ile ÇKARP veri setlerine dönüştürmüşlerdir. Alinaghian ve Shokouhi [2] ÇKARP problemini çoklu depo kavramını da ele alarak uyarlanabilir büyük komşuluk arama metasezgiseli yardımı ile çözmüşlerdir. Reed ve diğ. [3] ÇKARP probleminin klasik yapısını kompartımanların heterojen dağılımı ile değiştirmişlerdir. İlgili çalışmada yazarlar geliştirmiş oldukları S₃ ve S₄ stratejileri ile çok ürün ve çok kompartıman yapısını ürün ve kompartıman dağılımını eşit derecede heterojen yaparak kurmuşlardır. Elde ettikleri sonuçları bilinen en iyi sonuçlarla kıyaslamışlardır. Silvestrin ve Ritt [4] çalışmalarında ÇKARP probleminin çözümü için İteratif Tabu Arama Algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları algoritmayı literatürde oldukça yaygın kullanılan Christofides ve Golden veri setleri üzerine S₁, S₂, S₃ ve S₄ stratejilerini uygulayarak hazırladıkları veri setleri ile sınamışlardır. Elde ettikleri sonuçları benzer veri setlerini benzer stratejilerle kullanan çalışmalar ile kıyaslamışlardır. Abdulkader ve diğ. [5] çalışmalarında hibrit karınca kolonisi algoritması ile ÇKARP probleme çözüm geliştirmişlerdir. Christofides veri seti üzerinde S₃ ve S₄ stratejilerini kullanarak elde ettikleri veri seti ile algoritmayı sınamışlardır.

Kaabachi ve diğ. [6] ilgili problemin çözümü için Hibrid Adaptif Değişken Komşuluk Araması ve Hibrid Yapay Arı Kolonisi Algoritmalarını geliştirmişlerdir. Yazarlar geliştirdikleri algoritmanın performansını S₃ ve S₄ stratejilerini kullanarak oluşturulan veri setleri üzerinden sınamışlardır. Elde ettikleri sonuçları Reed ve diğ. [3], Abdulkader ve diğ. [5] ve Silvestrin ve Ritt [4] tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Bu yazarlar çalışmalarında kısmi talep bölünmesi (intermediate-split) yaparak problem çözmüşlerdir. Ele aldıkları problem yapısı klasik ÇKARP problem yapısında olduğu için gerçek hayat uygulamalarında karşılaşılan tam talep bölünmesi, ürün sayısı ile kompartıman sayılarının farklılıkları vb. kısıtları dikkate almamışlardır. Muyldermans ve Pang [7] ilgili problemin çözümü için Rehberli Yerel Arama sezgiselini kullanmıştır. Her ne kadar heterojen filoyu ele almış olsalar da klasik ÇKARP gibi ürün sayısı kompartıman sayısına eşit ve hangi tür ürünün hangi kompartımana atanabileceği önceden belirlidir. Efthymiadis ve diğ. [8] yaptıkları çalışmada, petrol ve gaz sektöründe karşılaşılan HFÇKRP'yi çözmek için mesafe ve kamyon işletme maliyetlerini minimize eden bir Karma Tamsayılı matematiksel model sunmuşlar ve problemin çözümünü LINGO ile gerçekleştirmişlerdir. İlgili çalışmada talep bölünebilirliği, zaman penceresi kısıtları dikkate alınmamıştır.

2.2 Stokastik talep ele alan ÇKARP çalışmaları

Klasik ÇKARP probleminin Stokastik talep içeren varyantının çözümünü için Mendoza ve diğ. [9], Mendoza ve diğ. [10] ve Goodson [11] çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında Stokastik talep durumunun ÇKARP problemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Mendoza ve diğ. [10], ÇKARP problemini Stokastik talep yapısı ile ele almışlardır. Yazarlar bu çalışmada klasik ÇKARP probleminin Stokastik talep olması halinde çözümünün sağlanması için MA algoritması geliştirmişlerdir. Ancak ele alınan çalışma klasik ÇKARP üzerine kurulduğu için bu çalışmada ele alınan birçok kısıtı sağlamamaktadır.

2.3 Ürün-kompartıman ataması sabit, kompartıman boyutu esnek ÇKARP çalışmaları

Literatürde ürün ataması sabit olup, kompartıman kapasitesini esnek olarak ele alan ÇKARP çalışmaları da bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek; Chajakis ve Guignard [12] çalışmalarında market ürünlerinin dağıtımı için iki olası kargo düzeni üzerinden hesaplama yapmışlar ve problemin çözümünü Lagrangian gevşetme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında sabit ve değişken kompartıman yapısını ele almışlar lakin talep bölünebilirliği ve ARP kısıtlarını dikkate almamışlardır. Hübner ve Ostermeier [13] yapmış oldukları çalışmada market ürünlerinin dağıtımında yükleme ve dağıtım maliyetlerini göz önüne alarak problemi büyük komşuluk arama algoritması ile çözmüşlerdir. Ostermeier ve diğ. [14] benzer problem yapısını farklı filo seçenekleri üzerinde test ederek karma filo yapısının maliyetleri %30'a kadar azaltabileceğini göstermişlerdir. Yapılan çalışmalarda her ne kadar esnek kompartıman yapısı dikkate alınmış olsa da üreticilerin talebinin bölünebilirliği, ARP probleminin yapısında özgü kısıtlar dikkate alınmamıştır. Martins ve diğ. [15] yapmış olduğu çalışmada market ürünlerinin dağıtımı için zaman periyodu ve zaman penceresi kısıtlarını göz önüne alan esnek kompartımanlı bir ÇKARP problemini; uyarlanabilir büyük komşuluk arama metasezgiseli ile çözmüştür. Henke ve diğ. [16] ÇKARP probleminin özelleştirilmiş türü olan esnek kompartımanlı ÇKARP probleminin çözümü için DKA geliştirmişlerdir. İlgili problem yapısında kısmi talep bölünmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Cam atıkları toplamak üzerine yapılan bir çalışmadır. Kompartıman sayısı ürün çeşidi kadar olabileceği gibi ürün sayısından az da olabilir. Bu çalışmada ele alınan yapıda bu durumun tersine de izin verilmektedir. Ayrıca bir ürün birden fazla araca atanabileceği için tam talep bölünmesi yapılmaktadır. Araçların toplam büyüklükleri aynıdır. Bu çalışmada ele alınan yapıda heterojen filoya izin verilmektedir.

Derigs ve diğ. [17] yapmış oldukları çalışmada ürün kompartıman atamasını ve kompartıman boyutunu hem sabit hem de esnek olarak ele almışlardır. Problemin çözümünde her iki problem varyantını kapsayan bir matematiksel model ve sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Ancak kompartıman sayısının ürün sayısından az olma durumu dikkate alınmamıştır.

Shang ve diğ. [18] çalışmalarında, kaynak ayrıştırılmalı atık toplama ve taşıma için çok kompartımanlı yeşil konum rotalama probleminde esnek çok kompartımanlı araçlar ile karbon emisyonu şartlarını dikkate alarak, Q-öğrenme ve çok-strateji tabanlı hiper-sezgisel algoritma ile çözüm sunmuşlardır. Ancak ilgili çalışmada bölünebilir talep kısıtı dikkate alınmamıştır. Wang ve diğ. [19] çalışmalarında

bozulabilir ürünlerin elektrikli araçlarla taşınmasında oluşan yönetim problemlerine çözüm önerisi sunmaya çalışmışlardır. Yazarlar nem ve sıcaklık kısıtlarını dikkate alan esnek ÇKARP'nin çözümüne yönelik matematiksel model, hibrit adaptif geniş komşuluk arama algoritması ve tabu arama sezgiseli geliştirilmiştir. Ancak çalışmada heterojen filo, bölünebilir talep kısıtları dikkate alınmamıştır.

2.4 Ürün-kompartıman ataması esnek zengin ÇKARP çalışmaları

ÇKARP literatüründe gerçek hayat problemlerini daha yakından ele alan çalışmalarda kompartımana atanacak ürünün sabit olması kısıtı ortadan kaldırılarak daha esnek bir problem yapısı ortaya koyulmuştur. Bu durum problem yapısını gerçek hayat vakalarına yaklaştırırken problemin zorluk derecesini arttırmaktadır.

Açıklanan problem yapısını çözmeye çalışan çalışmalar incelendiğinde farklı konu başlıklarından çalışmalar olduğu gözlemlenmiştir. Atık toplama problemi için Henke ve diğ. [20], Henke ve diğ. [16], Kiilerich ve Wøhlk [21], Zbib ve Laporte [22] çalışmaları, bozulabilir gıda toplama problemi için Caramia ve Guerriero [23], [24], Sethanan ve Pitakaso [25], Polat ve Topaloğlu [26], Polat ve diğ. [27] örnek olarak gösterilebilir. Yakıt dağıtım problemlerinde ilgili problem yapısı ele alınarak çözüm aranan çalışmalara ise [28-30] ve Coelho ve Laporte [31] örnek olarak gösterilebilir. Çoklu tank taşıma kavramı ve farklı ürün tipi kavramları ise Akaryakıt Dağıtım Problemi (ADP) ve ÇKARP literatürlerinde de yer almaktadır. Ancak ilgili literatürler incelendiğinde ADP'de müşteri talepleri genellikle çok yüksek olmakta ve tanklar genellikle tek bir müşteriye tahsis edilmektedir [28-30].

Literatürde ele alınan çalışmalar incelendiğinde Zengin ÇKARP için yapılan çalışmalar özel problem yapıları için geliştirildiğinden genel problem yapısına özgün çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında, bölünebilir talep koşullu HFÇKZPARP problemi ele alınarak gerçek hayat kısıtlarını içeren matematiksel model ve problemin çözümünde kullanılacak DKA, YAKA algoritmaları geliştirilmiştir.

3 Matematiksel model

Polat ve diğ. [24] tarafından süt toplama probleminin yapısına uygun olarak geliştirilen matematiksel model bu çalışma kapsamında ele alınan problem yapısına uygun hale getirilmiştir. HFÇKZPARP için $(G=(N,A))$ yönlü bir serim olsun Burada N düğüm kümesi $(N=\{0,...,n\})$ ve A ayrıt kümesidir. Ayrıt kümesinin gösterimi $A=\{(i,j):i \in N,j \in N \setminus \{0\},i \neq j\}$ şeklindedir. Matematiksel modelin varsayımları;

- Toplanacak ürün miktarı belirli ve sabittir,
- Anlaşılmalı olunan her talep merkezinin ürettiği tüm farklı tiplerdeki ürünler toplanmalıdır,
- Ürünler tiplerine göre ayrılarak toplamaya hazır halde bekletilmektedir,
- Bir üreticide her tip ürün bulunması mümkündür.
- Farklı tiplerdeki ürünler birbirleri ile karıştırılmamalıdır,
- Farklı üreticilerden alınan aynı tip ürünlerin karıştırılmasına izin verilmektedir,
- Her tanker rotasına depodan başlar ve rotasını burada bitirir,

- Bir tanker bir talep merkezini sadece bir kere ziyaret edebilir,
- Toplanan ürün miktarı tank kapasitesini geçemez.
- Ürün toplama işlemi belirlenen süre zarfında tamamlanmak zorundadır,
- Servis süreleri talebin bölünebilirliğinde bağımsız sabit alınmıştır.

Matematiksel modelde kullanılan notasyonlar, parametreler ve karar değişkenleri şu şekildedir:

İndisler

- $i, j \in N$ Düğüm Seti (0: depo/üretim merkezi, 1.. N: talep noktaları)
 $k \in K$ Araçlar Seti
 $l \in L$ Kompartımanlar Seti
 $m \in M$ Ürün Tipleri

Parametreler

- a_{ij} Düğüm arası mesafe
 Q_{kl} k aracının l kompartımanının kapasitesi
 d_{im} i üreticide bulunan m tipi ürün miktarı
 s_i i üretici servis süresi
 T Oluşturulacak rotanın en fazla süresi
 P Çok büyük bir sayı
 E_i i üreticinin en erken ziyaret edilebildiği an
 G_i i üreticinin en geç ziyaret edilebildiği an
 C_k k aracının kullanım maliyeti
 γ_k Birim yakıt maliyeti

Karar Değişkenleri

- x_{ijk} 1: Eğer i düğümden j düğüme gidiliyorsa 0:dd
 w_{klm} 1: Eğer k . tankerin l . tankına m tipi ürün yüklenirse 0:dd
 y_{ik} 1: Eğer i düğüm k . tanker tarafından ziyaret edilirse 0:dd
 z_{iklm} 1: Eğer i düğümdeki m tipi ürün k . tankerin l . tankına yüklenirse 0:dd
 b_{im} 1: Eğer i düğümdeki m tipi ürün atanırsa 0:dd

Pozitif Değişkenler

- f_{iklm} i üreticiden alınarak k . tankerin l . tankına yüklenen m tipi ürün oranı
 h_{ik} k . tankerin i düğüme hizmet vermeye başladığı an.

Yukarıda verilen notasyonlar doğrultusunda karma tamsayılı doğrusal model olarak tasarlanan, bölünebilir talepli çok kompartımanlı araç rotalama kısıtlarını içeren model şu şekildedir;

$$\min Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \gamma_k a_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} C_k Y_{0k} \quad (1)$$

kısıtları altında

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{jik} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} - \sum_{i \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{iik} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} + \sum_{j \in N} x_{jik} = 2y_{ik} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad S \subset N: S \neq \emptyset, k \in K \quad (6)$$

$$z_{iklm} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K, l \in L, m \in M \quad (7)$$

$$z_{iklm} \leq w_{klm} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K, l \in L, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} z_{iklm} \leq 0 \quad \forall i \in N, m \in M: D_{im} = 0 \quad (9)$$

$$w_{klm} \leq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} z_{iklm} \quad k \in K, l \in L, m \in M \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M} w_{klm} \leq 1 \quad k \in K, l \in L \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} a_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} s_i y_{ik} \leq T \quad k \in K \quad (12)$$

$$h_{ik} + a_{ij} - P(1 - x_{ijk}) + s_i \leq h_{jk} \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (13)$$

$$h_{ik} \geq E_i * y_{ik} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K \quad (14)$$

$$h_{ik} \leq G_i * y_{ik} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K \quad (15)$$

$$x_{i0k} \leq 2y_{ik} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K \quad (16)$$

$$y_{ik} \leq y_{0k} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} f_{iklm} = b_{im} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, m \in M \quad (18)$$

$$b_{im} P \geq d_{im} \quad \forall i \in N, m \in M \quad (19)$$

$$b_{im} \leq d_{im} \quad \forall i \in N, m \in M \quad (20)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{m \in M} d_{im} f_{iklm} \leq Q_{kl} \quad k \in K, l \in L \quad (21)$$

$$z_{iklm} \geq f_{iklm} \quad \forall i \in N, k \in K, l \in L, m \in M \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} f_{iklm} \leq 1 \quad m \in M \quad (23)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (24)$$

$$0 \leq f_{iklm} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K, \\ l \in L, m \in M \quad (25)$$

$$h_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (26)$$

$$w_{iklm}, z_{iklm}, y_{ik}, b_{im} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K, \\ l \in L, m \in M \quad (27)$$

Amaç fonksiyonu (1) mesafe ve araç kullanım maliyeti toplamını en küçüklemeyi hedeflemektedir. Her düğümün en az bir araç tarafından ziyaret edilmesi kısıt (2) tarafından sağlanırken, bir aracın giriş yaptığı düğümden çıkış yapması ile rota sürekliliğinin sağlanması kısıt (3) ile sağlanmaktadır. Kısıt (4), iç alttur oluşumunu engelleyerek modelin performansını artırmayı amaçlamaktadır. Kısıt (5), araçlar ve ziyaret edilen düğümler arasındaki ilişkiyi tanımlarken, kısıt (6) olası alt tur oluşumunu engellemektedir [32]. Kısıt (7) ve (8), ziyaret ve yük karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu kısıtlamalar, eğer i düğümünün m ürün tipi, k araç üzerindeki l kompartımanına atanırsa, ilgili ziyaret ve yük karar değişkenlerinin değerlerinin 1 olmasını, diğer durumda ilgili değişkenlerin 0 olmasını sağlamaktadır. Kısıt (9), eğer i düğümü bir veya daha fazla m ürün tipi içeriyorsa, k araçındaki l bölmesinin i düğümünün ilgili ürün tipine atanabilmesini sağlar. Kısıt (10), atama işleminin yapılabilmesi için m tipi ürünün bir veya daha fazla düğümde bulunması gerektiğini belirtmektedir. Kısıt (11), farklı ürün türlerinin ayrı ayrı toplanması için k aracının l kompartımanına en fazla bir ürün tipinin yüklenebileceğini belirtir. Kısıt (12), en fazla seyahat süresinin aşılmasını önlemektedir. Kısıt (13), i düğümünü ziyaret ettikten sonra j düğümüne ulaşmak için geçen toplam süreyi hesaplar. Kısıtlar (14) ve (15), zaman penceresi aralığını temsil eder. Coelho ve Laporte [31] tarafından önerilen mantıksal eşitsizlik kısıtlamaları (16) ve (17), yönlendirme, ziyaret ve atama değişkenleri arasındaki analitik bağlantıları iyileştirmek için model formülasyonuna eklenmiştir. Kısıt (16), eğer i düğümü k aracının güzergahı üzerindeyse, i düğümünün k aracı tarafından ziyaret edilmesini sağlar. Kısıt (17), her aracın rotasını tamamladıktan sonra depoya geri geldiğini belirtir. Kısıt (18), (19) ve (20) tam talep bölünmesini sağlamaktadır. Kısıt (21), bir kompartımana en fazla kapasitesi kadar yükleme yapılmasını sağlamaktadır. Bir düğümün atanması ile talep oranı arasındaki ilişkiyi kısıt (22) ile kurulmaktadır. Ürünlerin dağıtım oranı toplamının en fazla bir olması (23) numaralı kısıtla desteklenmektedir. (24), (25), (26) ve (27) kısıtlamaları değişken tanımlama kısıtlarıdır.

4 Sezgisel algoritmalar

Daha önce yapılan klasik ÇKARP problemi çözüm çalışmalarında problem yapısının NP-Zor olduğu kanıtlanmış ve problem çözümüne yönelik sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir ([1],[31]). Bu çalışmada ele alınan problem yapısının bağımsız ürün ve kompartıman yapısı, tam bölünebilir talep yapısı içermesi nedeniyle karmaşıklık boyutu artmıştır. Büyük çaplı problemler ele alındığında, miktarı üstel olarak artan tüm seçenekleri taramak oldukça güç ve zaman alıcı olacağı için ilgili problemin çözümüne yönelik iki farklı sezgisel algoritma geliştirilmiş, ilgili algoritmalar literatürden elde edilen veriler ile sınanmıştır.

YAKA ve DKA literatürde birçok ARP varyantının çözümünde başarıyla yaygın olarak kullanılmış ve literatürde yayınlanmış

olan diğer tekniklerle rekabet edebilir düzeyde uygulanmıştır. İlgili literatür bilgisi aşağıdaki başlıklarda detaylandırılmıştır.

4.1 Yapay ari kolonisi algoritması

YAKA bal arılarının besin kaynağı arayışlarındaki davranışlarından ilham alan Karaboga [33] tarafından önerilmiştir. Bir besin kaynağının konumu, bir optimizasyon probleminin çözümüne karşılık gelirken, o besin kaynağının nektar miktarı çözeltinin kalitesini temsil eder.

Literatürde çeşitli alanlarda geliştirilmiş YAKA uygulaması bulunmaktadır. Yang [34] çalışmasında sayısal fonksiyon optimizasyonu için YAKA algoritmasını kullanırken, Irani ve Nasimi [35] ilgili algoritmayı yapay sinir ağlarını eğitmek için kullanmıştır. YAKA algoritmasının ARP çözümünde kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur Szeto ve diğ. [36], Zhang ve diğ. [37] ve Ng ve diğ. [38]. YAKA algoritmasının kullanımı hakkında detaylı literatür bilgisi için Kaya ve diğ. [39] 2022 yılında yapmış oldukları çalışma önerilmektedir.

4.2 Değişken komşu arama algoritması

Modern sezgisel yöntemler arasında yer alan DKA algoritması 1997 yılında Nenad Mladenovic ve Pierre Hansen tarafından geliştirilmiştir [40]. Ortaya atıldığı tarihten bu yana, sürekli geliştirilen ve sayısız alanda uygulamaları olan DKA algoritması farklı komşuluk yapılarını eş zamanlı olarak kullanan bir metasezgisel çözüm algoritmasıdır. Aramada kullanılan komşuluk yapılarının sistematik biçimde değiştirilmesi esasına dayanan DKA, kombinatoriyal ve global optimizasyon problemlerini çözmeyi amaçlayan basit ve etkili bir sezgiseldir [41].

Literatürde çeşitli alanlarda gerçekleştirilmiş çok sayıda DKA uygulamasına rastlamak mümkündür [42]. DKA algoritmasının yaygın uygulama alanlarından birini ARP oluşturmaktadır. Örneğin, Crispim ve Brandao [43], Kytöjoki ve diğ. [44], Fleszar ve diğ. [45], Kuo ve Wang [46], Stenger ve diğ. [47] ve Salhi ve diğ. [48] ARP'nin, farklı sektörlerle ilişkin uygulamalarını gerçekleştirmiş ve problemlerin çözümünde DKA algoritmasından yararlanarak ve oldukça etkin sonuçlar elde etmişlerdir. Hemmelmayr ve diğ. [49] ve Pirkwieser ve Raidl [50] ise araçların farklı müşterileri farklı dönemlerde ziyaret etmesine olanak tanıyan periyodik ARP'nin çözümü için DKA algoritmasını kullanmıştır. Polat ve diğ. [51], Polat [52] ve Kalaycı ve Kaya [53] çalışmalarında literatürde oldukça sık karşılaşılan eş zamanlı topla-dağıt ARP'nin, Polat [54] bölünebilir topla-dağıt ARP'nin çözümü için DKA algoritmasını uygulamış ve literatürde yer alan diğer çalışmalara kıyasla oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

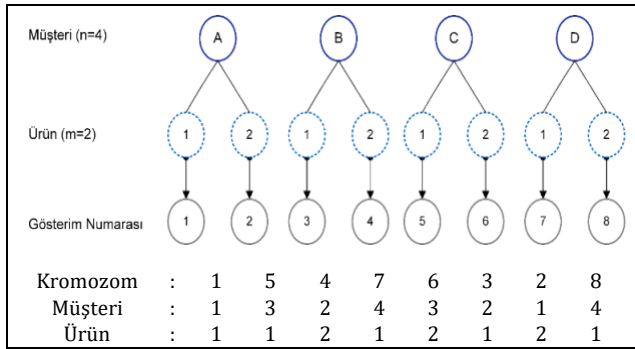
Bu çalışmada, YAKA ve DKA algoritmalarının temel çözüm yaklaşımı olarak tercih edilmelerinin temel nedeni, yukarıdaki paragrafta kısmen özetlenen ilgili literatür araştırmalarından edinilen bilgide geliştirilen çözüm yaklaşımlarının ARP varyasyonlarına uygulanan diğer algoritmalara kıyasla daha başarılı sonuçlar elde etmesidir. YAKA ve DKA algoritmaları için akış diyagramları

4.3 Çözüm gösterimi

Oluşturulan sezgisel algoritmalarda çözüm gösterimi algoritmanın çalışma performansını etkileyen önemli kriterlerden biridir. Beasley [55] tarafından oluşturulan önce rotayı belirle, sonra kümelendir yaklaşımı uygulanarak araç kapasitesi, maksimum tur uzunluğu vb. kısıtlar gevşetilerek büyük bir tur hesaplanmaktadır. Rota belirlendikten sonra

araçlara atamalar gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada problem gezgin satıcı problemine benzemektedir. Araç rotaya depoda başlamakta ve rotayı depoda bitirmektedir. Bu yöntemin çözüm gösteriminde kullanılması ile birlikte çözüm gösteriminde herhangi bir noktadan bölme işlemi uygulamak kolaylaşıp, çarpazlama işlemi için uygun bir gösterim oluşmuş olmaktadır.

Beasley tarafından oluşturulan dev tur yaklaşımının ARP uygun gösterimi Fallahi ve diğ. [1] tarafından yapılan çalışmada ortaya koyulmuştur. Ortaya koyulan yöntemi bir örnekle açıklanırsa, 4 müşterinin (n=4) ve 2 ürün tipinin (n=2) olduğu bir durumda gösterim şekli için oluşturulan numaralandırma sistemi Şekil 1'de, oluşturulan rassal bir kromozom ile verilmiştir.



Şekil 1. Çözüm gösterimi numaralandırma yöntemi.

Figure 1. Solution representation and numeration method.

Literatürde yapılan ÇKARP çalışmalarında tüm üreticilerde bulunan ürün sayısı ve araçlarda bulunan kompartıman sayısı eşit olarak alınmış ve algoritmaların yapıları bu temel mantık üzerine kurulmuştur. Ancak bu çalışmada oluşturulan algoritmada üreticilerde bulunan ürün sayısı eşit olmak zorunda değildir. Araçların kapasitesi ve kompartıman sayıları da birbirinden farklı olabilmektedir.

Literatürde yapılmış olan çalışmaların çözüm gösterimleri incelenmiştir. ÇKARP problemlerinin çözümü için yapılmış olan çalışmalarda ele alınan temel varsayımlardan bir tanesi her üreticide her ürün grubundan bulunmasıdır. Ancak HFÇKZPARP probleminin yapısında ise her düğümde her ürün tipinden bulunma koşulu yoktur. Bu durum ele alınan problem yapısını biraz daha zorlaştırmaktadır.

ÇKARP ele alınan temel varsayımlardan bir diğeri ise araçların homojen yapıda olması ve ürün çeşidi kadar kompartıman sayısı bulunmasıdır. Bu durum gerçek hayat koşullarında bu şekilde olmamaktadır. HFÇKZPARP probleminde de bu durum oldukça önemli bir kısıttır. Yapılan çalışmada heterojen bir araç filosu kullanılacağı ve araçların kapasitelerinin de birbirinden farklı olabileceği göz önüne alınmıştır.

Bu nedenle problemin yapısı ve kısıtlarının daha kolay ifade edilebilmesi açısından projenin ilerleyen aşamasında geliştirilen sezgisel algoritmada matris tabanlı çözüm gösteriminin kullanılmasına karar verilmiştir. HFÇKZPARP probleminin temel varsayımları göz önüne alınarak, problem yapısına uygun heterojen çok kompartımanlı araç rotalama problemlerinde kullanılacak yeni bir çözüm gösterimi oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm gösterimi verilen örnek üzerinden açıklanmıştır.

Örnek problemde bulunan üreticiler ve ürettikleri ürün miktarları ile ilgili bilgiler Tablo 1'de (Örneğin 1 No.lu düğümde sırasıyla A, B tipi ürünlerden 50, 100 birim bulunmaktadır.), her bir kompartıman ile ilgili bilgiler Tablo 2'de (Örneğin 1 No.lu araç her biri 100 birim hacimde iki kompartımandan oluşmaktadır.) sunulmuştur.

Tablo 1. Üreticiler ve ürettikleri ürün tipleri.

Table 1. Producers and product types.

Düğüm	Ürün tipi		
	A	B	C
1	50	100	0
2	80	100	50
3	60	0	0
4	0	70	0
5	0	0	200
6	0	100	160
7	30	40	50

Tablo 2. Araç – Kompartıman Verileri.

Table 2. Vehicle-Compartment Data.

Araç	Kompartıman		
	1	2	3
1	100	100	
2	100	100	100
3	150	150	150
4	100	100	

Verilen örnekte 7 düğüm ve 3 farklı tip ürün bulunmaktadır. Oluşturulan gösterim prosedürü bir üreticinin numarasını, ürün tipini ve toplanan ürün miktarını içerecek şekilde oluşturulmuştur. Verilen örnek için hazırlanan gösterim Tablo 3'te sunulmuştur. Verilen örnekte sunulan gösterimlerden ilki "10010100050" şeklindedir. Bu gösterim 1|001|01|00050 şeklinde çözümlenebilir. İlk karakter olarak verilen 1 rakamı gösterimi sabitlemek amacı ile kullanılmıştır. Bu gösterimde sisteme bulunan üretici sayısının en fazla 999 olabileceği göz önüne alınarak önce üretici, en fazla ürün tipinin 99 olabileceği göz önüne alınarak ürün tipi ve oluşan talebin en fazla 9.999 birim olabileceği göz önüne alınarak talep eklenmiştir. Bu durumda verilen gösterim 1. üreticinin 1. ürün tipinin 50 birimlik üretiminin bu tankla toplandığını göstermektedir. Verilen 1-2-3-4-5-6-7 rotasına sahip örneğin çözüm gösteriminin hazırlanmış hali Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Tasarlanan çözüm gösterimi.

Table 3. Designed solution representation.

Düğüm	Ürün tipi	Nümerik ürün tipi	Toplanan ürün miktarı	Gösterim
1	A	1	50	10010100050
1	B	2	100	10010200100
2	A	1	80	10020100080
2	B	2	100	10020200100
2	C	3	50	10020300050
3	A	1	60	10030100060
4	B	2	70	10040200070
5	C	3	200	10050300200
6	B	2	100	10060200100
6	C	3	160	10060300160
7	A	1	30	10070100030
7	B	2	40	10070200040
7	C	3	50	10070300050

Oluşturulan gösterimlerin tutulduğu gösterim matrisi ile rotada bulunan üretici, süt tipi, talep, tanker ve tank sistem bilgileri tutulurken rota bilgileri tutulmamaktadır. Gösterim

matrisi ile tankerlerin tanklarına yapılan atamaların uygunlukları kontrol edilmektedir. Bu nedenle rotaların oluşturdukları ziyaret sıralamaları sıralama matrisinde tutulmaktadır.

4.4 Başlangıç çözümü

Sezgisel algoritmalarda başlangıç çözümü için farklı alternatif yollar bulunmaktadır. ÇKARP'de kullanılan başlangıç çözümleri incelendiğinde Abdulkader ve diğ. [5], Alinaghian ve Shokouhi [2], Chen ve Shi [56] rassal başlangıç çözümü oluşturmuşlardır. Silvestrin ve Ritt [4] çalışmalarında Clarke ve Wright [57] tarafından oluşturulan kazanç (savings) sezgiseli ile Gillett ve Miller [58] tarafından geliştirilen birlikte süpürme algoritmasını kullanmıştır. Kaabachi ve diğ. [6] yaptıkları çalışmada ilk çözümü oluşturmak için Prins [59] tarafından oluşturulan önce rotala sonra kümelenendir algoritmasını uygulamıştır. Fallahi ve diğ. [1] çalışmalarında iki farklı başlangıç çözümü yöntemi kullanmıştır. Oluşturdukları ilk başlangıç çözümünü rassal bir şekilde, ikinci çözümü ise yarısında Clarke ve Wright [57] tarafından geliştirilen kazanç (savings) temelli sezgiseli kullanarak diğer yarısında ise rassal yapıyı kullanarak tasarlamışlardır. İki yöntemden elde ettikleri sonuçları kıyasladıklarında ikinci yöntemin birinci yöntemle göre çok az daha iyi sonuçlar aldığını ve elde edilen sonuçlar ile bir yöntemin diğerine göre daha iyi olduğu söylemenin mümkün olmayacağını ifade etmişlerdir.

HFÇZPARP çözümünde ÇKARP literatüründe yer alan yayınlar incelenmiş ve bu yayınlarda kullanılmış olan başlangıç çözümleri ile ilgili bilgiler Tablo 4'te sunulmuştur.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde sezgisel çözüm yöntemi ile problemi ele alan çalışmalarda rassal başlangıç çözüm yönteminin oldukça fazla tercih edildiği gözlemlenmiştir. İlgili çalışmalardan Reed ve diğ. [3], Abdulkader ve diğ. [5], Henke vd., 2015, Alinaghian ve Shokouhi [2], Henke ve diğ. [20], Chen ve Shi [56], Kaabachi ve diğ. [6], Wang ve diğ. [60], başlangıç çözümlerini rassal olarak oluşturmuştur. İlgili literatür gözlemlendiğinde bu çalışmada yapılan sezgisel algoritmaların başlangıç çözümünün rassal olarak tasarlanmasına karar verilmiştir.

4.5 Komşuluk yapıları

Her iki sezgisel algoritma yapısında kullanılacak komşuluk yapıları tasarlanarak algoritmaların performanslarının daha adil değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Algoritmaların çalışması esnasında nesiller boyu aktarılan 2 matris bulunmaktadır. Oluşturulan matris örneği Tablo 5'te sunulmuştur. Bu matrislerden bir tanesi ziyaret sıralamalarının tutulduğu sıralama matrisi diğeri ise düğümlerin düğüm numarası, ürün tipi ve rotaya atanan ürün miktarını tutan gösterimlerin bulunduğu gösterim matrisidir. Algoritma sıralama ve gösterim matrisleri üzerinden operatörlerin değişim işlemlerinin gerçekleştirilmesi ile çalışmaktadır. Tablo 5'te başlangıç çözümü yapılan bir örnek gösterilmektedir ve başlangıç çözümünde kullanılan rassal algoritmanın başlangıç aşamasında talebi karşılayabilmek amacıyla geçici olarak üretmiş olduğu sahte tankerler ile çözüm sağlanmıştır.

Oluşturulan algoritmada tasarlanan operatörler kullanım amaçlarına göre 4 grup altında kategorize edilmiştir. İlk grup rota içi değişimler gerçekleştirerek rotanın iyileştirilmesini amaçlayan ve sıralama matrisi üzerinden işlem yapan rota içi

operatörler grubudur. İkinci grup rotalar arası değişim işlemlerini gerçekleştirerek rotaların geliştirilmesinde kullanılan rotalar arası sıralama değişim operatörleri grubudur. Üçüncü grup üreticilerin ürünlerinin hem tip bazında hem de miktar bazında bölünmesini mümkün kılan rotalar arası sıralama bölme operatörleri grubudur. Dördüncü grup gösterim matrisi üzerinde işlemlerini uygulayan ve oluşturulan gösterimlerin rotalar arasında değişimini sağlayarak rotalarda iyileştirmeler sağlamayı hedefleyen rotalar arası gösterim değişimleri grubudur. Tasarlanan operatörler ve açıklamaları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 4. ÇKARP başlangıç çözümleri.

Table 4. MCVRP initial solutions.

Yazar	Rassal	Clarke Wright Tasarım algoritması	Angular Sweep algorithm	Variable Greedy Approach	Greedy algorithm	Lin-Kernighan Heuristic	stochastic best insertion (SBI) heuristic	2SP Solution	Yeni başlangıç çözümü prosedürü
Fallahi ve diğ. [1]	✓								
Oppen ve Løkketangen [24]									✓
Muyldermans ve Pang [7]	✓								
Mendoza ve diğ. [9]							✓		
Reed ve diğ. [3]	✓								
Wang ve diğ. [61]									✓
Abdulkader ve diğ. [5]	✓								
Henke ve diğ. [16]	✓					✓			
Silvestrin ve Ritt [4]		✓	✓						
Alinaghian ve Shokouhi [2]	✓								
Hübner ve Ostermeier [13]	✓								
Henke ve diğ. [20]	✓								
Chen ve Shi [56]	✓				✓				
Chen ve diğ. [62]								✓	
Kaabachi ve diğ. [6]	✓								
Wang ve diğ. [60]	✓								
Bu Çalışma	✓								

4.6 Sarsım

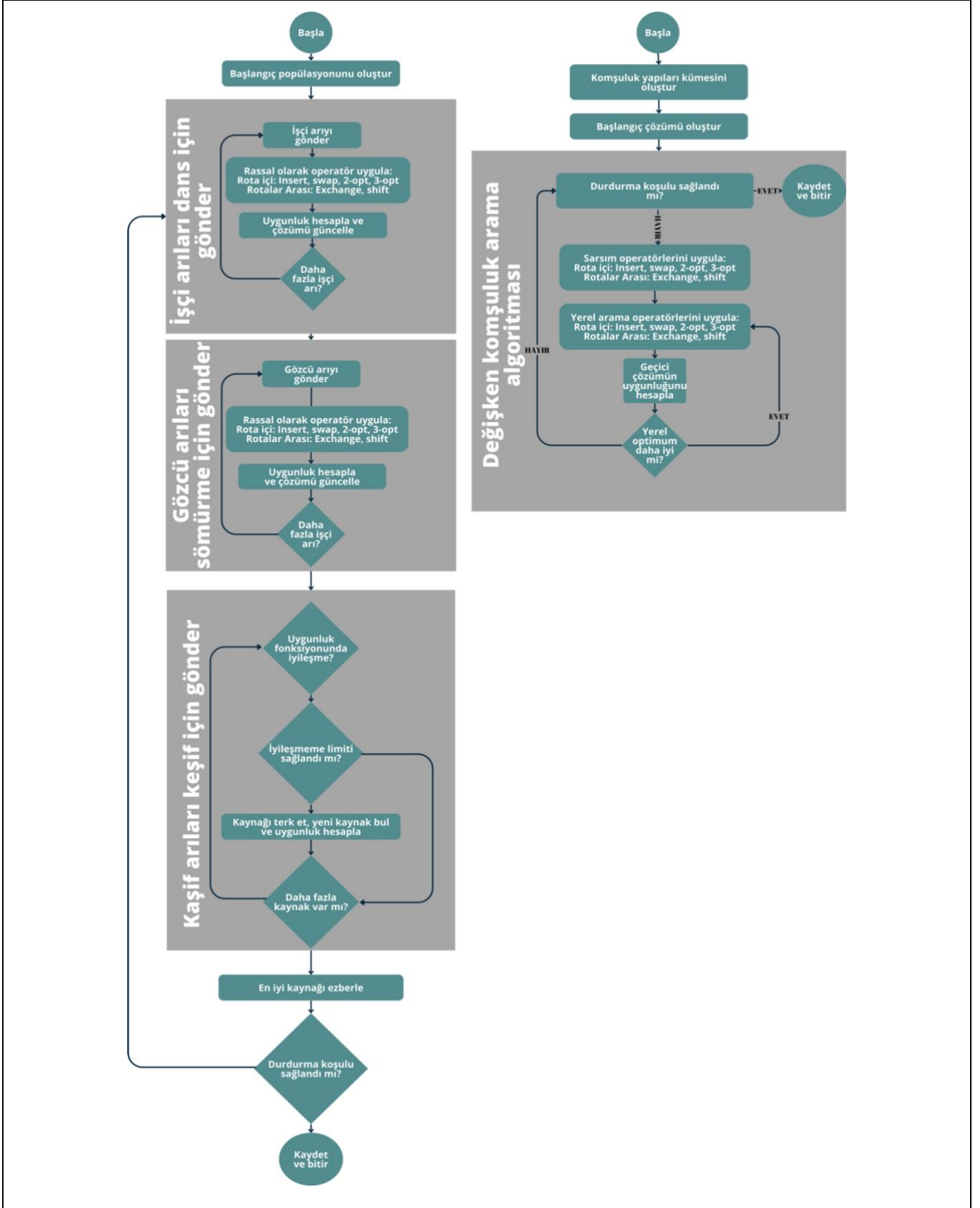
Sarsım aşamasında operatörlerin kullanacakları rotalar rassal olarak belirlenirken yerel arama aşamasında operatörlerin kullanacakları rotalardan en az bir rotanın sarsım aşamasında değişikliğe uğramış rotalardan seçilmesi sağlanmıştır. Bu yapı ile sarsım aşamasında operatörlerin üzerinde işlem yapmış olduğu rotalarda gelişme sağlanması hedeflenmiştir. Yerel aramadan çıkan rotalara düzeltme amacıyla grup 1'de bulunan rota içi operatörler uygulanmaktadır. Dağıtım aşamasında ise belirli bir sürede gelişim göstermeyen en iyi çözümün kısmi olarak değişiminin sağlanması için rotalar arası sıralama değişim operatörleri kullanılmaktadır.

Tablo 5. Algoritmalarda kullanılan sıralama ve gösterim matrisi örneği.
Table 5. Sequencing used in the algorithms and demonstration matrix sample.

		Tank 1		Tank 2		Tank 3		
Gösterim	Tanker 1	10060200100		10020100080				
	Tanker 2	10020200100		10010100050		10050300100		
	Tanker 3	10050300100	10070300050	10070200040	10010200100		10030100060	
	Tanker 4	10010200100		10060300100				
	Sahte Tanker 1	10060300060	10020300040	10020300010				
	Sahte Tanker 2	10070100030		10040200070				
Rota	Tanker 1	6	→	2				
	Tanker 2	2	→	1	→	5		
	Tanker 3	5	→	7	→	1	→	3
	Tanker 4	1	→	6				
	Sahte Tanker 1	6	→	2				
	Sahte Tanker 2	7	→	4				

Tablo 6. Algoritmalarda kullanılan komşuluk yapıları.
Table 6. Neighborhood structures used in the algorithms.

Grup	Matris	Operatör İsmi	Amaç
Rota içi Operatörler	Sıralama	Yerine Koyma Operatörü (Best insert)	Rastgele seçilen bir rotanın tüm elemanları için yer değişiminin gerçekleşmesi halinde oluşacak en iyi rota hesaplanır.
		Ters Çevirme Operatörü (Best Swap)	Rastgele seçilen bir rotada bulunan tüm noktalar için eleman değişimlerinin gerçekleşmesi halinde oluşacak en iyi rota sonuçları hesaplanmaktadır.
		2_opt ve 3_opt Operatörleri	Literatürde k_opt yöntemi olarak adlandırılan bağlantı değişim prosedürü uygulaması için rota içinde bulunan k adet doğru parçası silinerek ters çevrilmekte ve rotaya tekrar eklenmektedir
Rotalar Arası Sıralama Değişim Operatörleri	Sıralama	Çoklu karşılıklı değişim (Exchange) Operatörü	Rassal olarak seçilen 2 rotanın sıralama matrislerinden rassal olarak seçilen büyüklüklerde elemanların yer değiştirmesi ile yeni rota sıralamalarının oluşmasını sağlayan operatördür.
		Kaydırma (Shift) Operatörü	Rastgele seçilen 2 rotadan bir tanesinden rastgele seçilen bir üreticinin diğer rotaya yerleştirilmesi ile yeni sıralamaların elde edilmesini sağlayan operatördür.
		Tekli karşılıklı değişim (Exchange) Operatörü	Rassal olarak seçilen 2 rotanın sıralama matrislerinden rassal olarak belirlenen birer elemanın yer değiştirmesi ile yeni rota sıralamalarının oluşmasını sağlayan operatördür
Rotalar Arası Sıralama Bölme Operatörleri	Sıralama	Kaydırma ve Bölme Operatörü 1 (Shift Split Type 1)	Bu operatörün hedefi rassal olarak seçilen bir rotadan rassal olarak seçilen bir üreticinin rassal olarak seçilen bir ürün tipini ilgili rotadan çıkarıp uygun ürün tipinden olan veya boş kompartımanı olan rotalardan rassal olarak seçilen iki rotaya dağıtmaktır.
		Kaydırma ve Bölme Operatörü 2 (Shift Split Type 2)	Bu operatörün hedefi bir rotada birden fazla ürün tipi olan üreticiler arasından bir tanesinin tüm ürün tiplerinin benzer ürün tiplerini içeren veya boş kompartımanı olan rotalardan rassal olarak belirlenen 2 rotaya atamaktır
Rotalar Arası Gösterim Değişim Operatörleri	Gösterim	Kısmi Tekli Kaydırma	Bu operatörün amacı rassal olarak seçilen bir rotada bulunan gösterimler arasından, rassal olarak seçilen bir tanesinin, belirlenen uygun rotalardan bir tanesinin gösterim matrisine rassal olarak atanmasını sağlamaktır.
		Kısmi Karşılıklı Tekli Değişim	Bu operatörün amacı rassal olarak seçilen iki rotada bulunan birer gösterimin karşılıklı olarak yer değişimini sağlamaktır.



Şekil 2. YAKA ve DKA Algoritmaları için Akış Diyagramları.

Figure 2. Flowchart for ABCA ve VNS Algorithms.

4.7 Veri seti

Literatürde bu çalışmada yer alan kısıtları test edebilecek uluslararası kabul görmüş bir veri seti bulunmamaktadır. Oluşturulan algoritmaların test edilebilmesi için ihtiyaç duyulan veri setleri, literatürde kabul görmüş Solomon veri setinin ilgili kısıtlar dahil edilerek geliştirilmiş hali ile elde edilmiştir. Zaman pencereli araç rotalama problemleri (ZPARP) için hazırlanan Solomon veri setleri literatüre 1987 yılında kazandırılmıştır. Her bir veri setinde homojen araçların kapasite ve sayı bilgisi, üreticilerin ise konumları, talepleri, erken ve geç geliş için belirlenen zaman pencereleri ve servis süreleri bulunmaktadır. Oluşturulan zaman pencereleri dar zaman penceresi ($R1, C1, RC1$) ve geniş zaman penceresi ($R2, C2, RC2$) olarak 2 kategoride oluşturulmuştur. İlgili veri setleri 25, 50 ve 100 üretici için 3 set olarak hazırlanmıştır. Solomon veri setlerinde temel olarak 6 farklı grup bulunmaktadır. Bu gruplar rassal olarak üretilmiş olan $R1, R2$ grupları, kümelenmiş veri grupları $C1, C2$ ve rassal ve kümelenmiş yapıda hazırlanan $RC1$ ve $RC2$ gruplarıdır. Bu çalışmada geliştirilen algoritmaları test edebilmek için ilgili veri setinin 100 düğüm içeren veri setleri ele alınmıştır.

Veri setinin heterojen filolu ve çok kompartımanlı hale getirilebilmesi için Jiang ve diğ. [63] tarafından Solomon veri seti üzerinden geliştirilen heterojen filolu araç yapısı her bir araçta kompartıman sayısı 2 olacak şekilde çok kompartımanlı hale getirilmiştir. İlgili işlem sonucu oluşan araçlar Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Heterojen filolu Solomon veri seti [63],[64].

Table 7. Solomon data set with heterogenous fleet [63],[64].

Veri Grubu	Araç Tipi	Araç Sayısı	Kompartıman Kapasitesi		Geç Dönüş	Sabit maliyet	Değişken Maliyet
			1	2			
HR1	A	10	25	25	180	80	1
	B	15	40	40	200	140	1.2
	C	10	60	60	230	250	1.4
HR2	A	10	150	150	800	45	1
	B	5	200	200	1000	70	1.2
HC1	A	20	50	50	1000	30	1
	B	5	100	100	1236	80	1.2
HC2	A	20	200	200	3000	100	1
	B	5	250	250	3390	140	1.2
HRC1	A	10	20	20	200	60	1
	B	20	40	40	220	150	1.2
	C	10	75	75	240	300	1.4
HRC2	A	10	50	50	900	150	1
	B	5	100	100	960	350	1.2

Veri seti yapısının çok ünlü hale getirilebilmesi için literatürde ÇKARP için geliştirilen veri bölme stratejileri

incelenmiştir. Fallahi ve diğ. [1] çalışmalarında problemi m kompartımanlı homojen araçların kullanıldığı varsayılarak geliştirmiş ve 14 örnek vakayı içeren veri setini probleme uygun hale getirebilmek için iki farklı strateji oluşturmuşlardır. *Strateji 1*'de (S_1) her düğüm talebi ve her araç kapasitesi m eşit parçaya bölünerek veri seti problem yapısına uygun hale getirilmiştir. *Strateji 2* (S_2) ise Eilon veri seti üzerinde uygulanmıştır. S_2 'de her bir müşterinin talebi $k \in \{3,4,5\}$ aralığında üretilen rassal k sayısına bölünmüş ($c_{i1} = c_i/k$) bölme işleminin sonucu birinci tip ürüne atanırken toplam talep ile farkı ise ikinci tip ürüne atanmıştır ($c_{i2} = c_i - c_{i1}$).

Reed ve diğ. [3] çalışmalarında veri setinin problem yapısına uygun olması için S_3 ve S_4 isimli 2 farklı strateji oluşturmuşlardır. Oluşturdukları S_3 stratejisinde izledikleri adımlar şu şekildedir; Müşteriler koordinatları baz alınarak 2 bölgeye ayrılır. Birinci bölgenin sınırları $x, y > 0$ ile $x < x_{max}/2$ ve $y < y_{max}/2$ formülleri ile belirlenir. İkinci bölge birinci bölge dışında kalan alanlardan oluşmaktadır. Birinci bölgede kalan düğümlerin talepleri %33'e %77 oranında bölünmektedir. İkinci bölgede kalan düğümlerin talepleri ise %25'e %75 oranında bölünmektedir. Reed ve diğ. [3] tarafından oluşturulan S_4 stratejisinde ise birinci bölge için %33'e %77 oranı, ikinci bölge için %20'ye %80 talep bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında Reed ve diğ. [3] geliştirdiği S_4 isimli Strateji Solomon veri setinin ürün talepleri üzerinde uygulanmıştır.

Sırası ile verilen işlemlerin Solomon veri setinin 100 düğüm içeren gruplarında uygulanmasıyla oluşturulan veri seti HFÇKZPARP yapısına uygun hale gelmiştir.

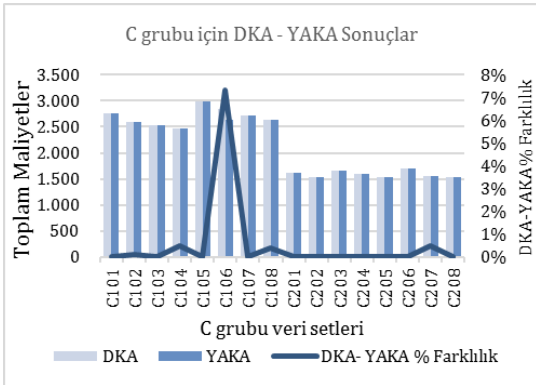
4.8 Sezgisel algoritmaların çalıştırılması

Durma koşulunun belirlenmesi, algoritmanın kritik bir aşamasıdır. Algoritma, en iyiye yakın sonucu üretmek amacıyla yeterli sürede çalışabilmeli ancak iyileştirme yapmadan gereksiz yere çalışmaya devam etmemelidir. Genellikle kullanılan durma koşulları; önceden belirlenmiş maksimum CPU zamanı, maksimum toplam iterasyon sayısı (s_{max}) ve iki iyileşme arasındaki maksimum iterasyon sayısı (p_{max}) olarak sıralanabilir. Bu koşullardan sadece biri kullanılabilir gibi iki veya daha fazlası da bir arada kullanılabilir. İstatistiksel testleri her parametre için eşit şartlar altında yapabilmek adına, öncelikli olarak maksimum iterasyon sayısı durdurma kriteri olarak belirlenmiş ve 100.000 alınmıştır.

Algoritmalar MATLAB R2019a sürümü kullanılarak geliştirilmiş ve Intel(R) Xeon(R) W-2145 CPU 3.70 GHz özelliklerine sahip işlemci 32 GB RAM içeren bilgisayar ile test edilmiştir.

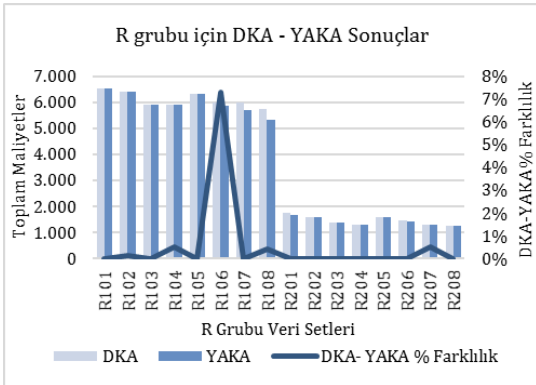
Algoritmaların her bir deney seti için çalıştırılması ile elde edilen en iyi maliyet sonuçları **Error! Reference source not found.**'de sunulmuştur. DKA ve YAKA sonuçları her bir veri grubu için incelendiğinde DKA algoritmasının YAKA algoritmasına kıyasla bazı veri setlerinde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. DKA algoritması C102, C104, C106, C108 ve C207 veri setlerinde YAKA algoritmasına göre daha etkin sonuçlar üretmiştir. C grubu için elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilde DKA algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği noktada çizginin üst noktaya ulaştığı gözlemlenebilmektedir. R ve RC grupları için elde edilen

sonuçlar benzer şekilde görselleştirilerek Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.



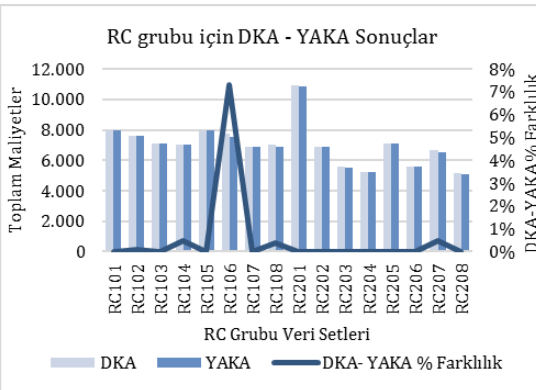
Şekil 3. DKA ve YAKA Algoritmalarının C grubu sonuçları.

Figure 3. Group C results of VNS and ABCA algorithms.



Şekil 4. DKA ve YAKA Algoritmalarının R grubu sonuçları.

Figure 4. Group R results of VNS and ABCA algorithms.



Şekil 5. DKA ve YAKA Algoritmalarının RC grubu sonuçları.

Figure 5. Group RC results of VNS and ABCA algorithms.

Şekil 3'te verilen sonuçlara göre DKA algoritmasının YAKA'ya göre ortalamada %0,55 daha iyi sonuçlar ürettiği, Şekil 3'te verilen sonuçlara göre %1,26 daha iyi sonuçlar ürettiği, Şekil 4'te ise ortalama %0,74 daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Anlamlı üstünlükler C102, C104, C106, C108, C207, R102-R108, R201-R203, R205-R208, RC102-RC103, RC105-RC-208 nolu veri setlerinde ortaya çıkmıştır. En baskın üstünlük ise C106 (%7,33), R108 (%7,38), RC106(%2,59) olarak ortaya çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde DKA algoritmasının YAKA algoritmasına kıyasla etkin sonuçlar verdiği veri setlerinin büyük bir oranda 106,107 ve 108 No.lu gruplarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. İlgili veri setlerinde daha iyi sonuçlar üretilmesinin temel nedeninin DKA algoritmasının yapısının eş zamanlı olarak iyileştirmeler yapmasından kaynaklanması olduğu düşünülmektedir.

5 Sonuçlar

Optimizasyon problemleri gerçek hayat problemlerini belirli varsayımlar altında çözmeye çalışmaktadır. Günümüz koşullarında karşılaşılan problemlerin güçlüğü her geçen gün artmakta ve ilgili problemlerin çözümünde kesin çözümlerle yaklaşım mümkün olmamaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan problem, kısıtları ve varsayımları göz önüne alındığında kesin yöntemlerle makul zaman zarfında çözümü mümkün olmadığı için NP-zor sınıfında yer almaktadır. Bu nedenle ilgili problemin çözümü için dağıtım temelli DKA ve YAKA algoritmaları geliştirilmiştir.

Geliştirilen algoritmalar, literatürde var olan veri setlerinin, çalışmanın içerdiği kısıtlar göz önüne alınarak şekillendirilmesi ile test edilmiştir. Elde edilen çözümler incelendiğinde DKA algoritmasından elde edilen sonuçların YAKA algoritmasından elde edilen sonuçlara kıyasla etkin çözümler sunduğu veri setlerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında bölünebilir talep yapısına izin veren HFÇKZPARP çözümüne yönelik matematiksel model ve problemin çözümünde kullanılacak iki sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların sınanması ve gelecek çalışmalar için hazır veri seti oluşturulabilmesi için literatürde bulunan ZPARP veri seti öncelikle heterojen filolu hale getirilmiş, sonrasında ilgili veri yapısı literatürde sunulan yöntemler dikkate alınarak çok ürünlü ve çok kompartımanlı hale getirilmiştir.

Günümüzde ticaret yöntemlerinin giderek daha çok elektronik ortamlara taşınması ile araçların çok ürün taşınması ve bu ürünlerin kendi özelliklerine uygun şekilde gruplanması gerekmektedir. Bu durum çalışmada sunulan problem yapısının geçerliliğini ve önemini artırmaktadır. Bu çalışmada HFÇKZPARP'de belirli ve sabit talep dikkate alınmış olup, stokastik talep ve zaman yapısı ile çok depo varyantı dikkate alınmamıştır. Gelecek çalışmalarda ilgili problem yapısının stokastik talep ve zaman yapısı göz önüne alınarak incelenmesi, çok depolu ve topla-dağıt araç rotalama problemi çerçevesinde konunun genişletilmesi mümkündür.

6 Conclusions

Optimization problems aim to solve real-life problems under certain assumptions. The difficulty of the problems encountered in today's conditions is increasing day by day, and it is not possible to approach them with exact solutions when solving the related problems. Considering its constraints and assumptions, the problem addressed within the scope of the study falls into the NP-hard class, as it is not possible to solve it using precise methods within a reasonable time. For this reason, distribution-based ABCA and VNS algorithms have been developed to solve the related problem.

The developed algorithms were tested by shaping the datasets available in the literature, taking into account the constraints of the study. When examining the solutions obtained, it has been observed that there are data sets for which the results

obtained from the DKA algorithm provide more effective solutions compared to the results obtained from the ABCA algorithm.

Tablo 8. DKA ve YAKA sonuçları.

Table 8. Results of VNS and ABCA.

Veri Setleri	DKA				YAKA				VNS-ABC % Farklılık
	Araç Sayısı	Toplam Maliyet	Ortalama Toplam Maliyet	Zaman (sn.)	Araç Sayısı	Toplam Maliyet	Ortalama Toplam Maliyet	Zaman (sn.)	
C101	22	2.760.74	2.761.57	1.270.42	22	2.760.74	2.762.39	1.481.35	0.00%
C102	22	2.600.27	2.604.95	1.425.91	22	2.597.29	2.605.60	1.339.12	0.11%
C103	19	2.538.52	2.543.34	1.286.09	19	2.538.52	2.547.65	1.378.90	0.00%
C104	19	2.469.08	2.470.56	1.283.68	19	2.457.16	2.458.14	1.611.53	0.48%
C105	22	2.991.07	2.992.27	1.334.30	22	2.991.07	2.998.55	1.403.00	0.00%
C106	23	2.837.06	2.837.34	1.330.68	22	2.629.21	2.632.89	1.636.84	7.33%
C107	22	2.713.53	2.715.97	1.305.37	22	2.713.53	2.721.40	1.406.62	0.00%
C108	22	2.635.16	2.637.53	1.347.56	22	2.624.74	2.626.32	1.439.16	0.40%
C201	7	1.607.79	1.608.92	919.14	7	1.607.79	1.607.79	1.026.39	0.00%
C202	7	1.542.39	1.543.78	938.41	7	1.542.39	1.548.25	957.69	0.00%
C203	8	1.662.00	1.664.49	935.90	8	1.662.00	1.666.98	959.36	0.00%
C204	7	1.599.38	1.602.10	947.63	7	1.599.38	1.600.50	1.066.61	0.00%
C205	7	1.540.07	1.543.00	1.003.77	7	1.540.07	1.544.38	1.091.74	0.00%
C206	8	1.691.27	1.694.15	958.52	8	1.691.27	1.692.12	1.024.72	0.00%
C207	7	1.551.36	1.552.61	905.74	7	1.543.93	1.545.94	1.130.29	0.48%
C208	7	1.542.19	1.544.19	884.79	7	1.542.19	1.543.11	967.74	0.00%
R101	29	6.533.30	6.539.83	2.144.39	29	6.533.30	6.535.91	2.272.53	0.00%
R102	28	6.392.95	6.401.26	2.262.52	28	6.390.26	6.405.60	2.322.59	0.04%
R103	26	5.906.92	5.909.87	2.264.52	26	5.902.11	5.921.00	2.552.84	0.08%
R104	26	5.906.92	5.909.87	2.324.59	26	5.902.11	5.912.14	2.206.46	0.08%
R105	27	6.328.34	6.332.77	2.300.56	28	6.306.72	6.325.64	2.460.74	0.34%
R106	26	5.986.69	5.992.68	2.394.67	25	5.877.97	5.885.03	2.713.02	1.82%
R107	26	5.977.47	5.982.85	2.156.40	25	5.693.47	5.715.67	2.480.76	4.75%
R108	23	5.734.53	5.741.98	2.164.41	23	5.311.38	5.321.47	2.606.90	7.38%
R201	10	1.756.81	1.756.81	1.616.60	9	1.682.80	1.683.30	1.881.79	4.21%
R202	9	1.568.87	1.570.44	1.600.12	9	1.566.61	1.570.21	1.754.44	0.14%
R203	9	1.382.97	1.385.05	1.636.08	9	1.378.58	1.381.34	2.097.54	0.32%
R204	8	1.277.04	1.277.80	1.624.09	8	1.277.04	1.277.80	1.860.81	0.00%
R205	9	1.575.86	1.577.28	1.766.42	9	1.575.49	1.580.53	2.034.61	0.02%
R206	9	1.438.10	1.440.11	1.658.55	9	1.435.67	1.439.41	1.971.68	0.17%
R207	8	1.311.49	1.313.32	1.633.08	8	1.309.10	1.312.37	2.037.61	0.18%
R208	8	1.261.27	1.261.27	1.586.64	8	1.254.22	1.258.36	1.775.41	0.56%
RC101	29	8.003.97	8.015.18	2.131.48	29	8.003.97	8.016.78	2.664.35	0.00%
RC102	30	7.620.72	7.630.63	2.073.35	30	7.617.43	7.630.38	2.606.22	0.04%
RC103	28	7.106.42	7.114.95	2.185.74	28	7.103.49	7.106.34	2.406.64	0.04%
RC104	26	7.006.20	7.013.91	2.098.54	26	7.006.20	7.013.21	2.346.57	0.00%
RC105	27	7.978.05	7.992.41	2.034.60	28	7.969.00	7.991.31	2.447.33	0.11%
RC106	28	7.741.93	7.751.99	2.073.35	28	7.541.06	7.559.16	2.210.93	2.59%
RC107	27	6.912.18	6.917.02	2.222.55	27	6.911.08	6.931.12	2.426.01	0.02%
RC108	27	7.004.46	7.009.37	2.296.19	27	6.852.75	6.856.18	2.590.72	2.17%
RC201	15	10.933.55	10.949.95	1.795.30	15	10.843.10	10.852.86	2.102.69	0.83%
RC202	15	6.853.53	6.861.75	1.739.70	15	6.852.93	6.861.84	1.958.80	0.01%
RC203	15	5.579.75	5.584.77	1.816.55	15	5.481.38	5.500.56	1.849.25	1.76%
RC204	15	5.261.62	5.266.88	1.947.36	15	5.208.29	5.220.79	2.220.41	1.01%
RC205	15	7.111.07	7.117.47	1.824.73	15	7.109.23	7.124.87	1.811.65	0.03%
RC206	15	5.593.88	5.598.36	1.798.57	15	5.588.87	5.602.29	2.143.56	0.09%
RC207	15	6.688.29	6.693.64	1.819.82	15	6.542.91	6.563.19	1.839.44	2.17%
RC208	15	5.145.80	5.151.97	1.939.18	15	5.099.54	5.116.37	1.878.68	0.90%

Within the scope of this study, a mathematical model for the solution of MCVRPTWHF, which allows a divisible demand structure, and two heuristic algorithms that can be used in solving the problem have been developed. To test these algorithms and to create a ready dataset for future studies, the VRPTW dataset in the literature was first made heterogeneous. Then, the related data structure was made multi-product and multi-compartmental, considering the methods presented in the literature.

Today, with the increasing shift of trade methods to electronic environments, vehicles must carry many products, and these products must be grouped according to their own characteristics. This situation enhances the validity and importance of the problem structure presented in the study. In this study, specific and fixed demand was considered in MCVRPTWHF, but stochastic demand and time structure, as well as the multi-warehouse variant, were not taken into account. In future studies, it will be possible to examine the related problem structure by considering stochastic demand and time structure, and to expand the subject within the framework of the multi-storey and collect-distribute vehicle routing problem.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Duygu TOPALOĞLU literatür taraması, matematiksel modelin ve sezgisel algoritmaların tasarlanması ve test edilmesi, elde edilen sonuçların yorumlanması ve makaleleştirilmesi başlıklarında; Olcay POLAT fikrin oluşması, tasarımın yapılması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Can Berk KALAYCI algoritmaların geliştirilmesi test işlemleri, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynakça

- [1] Fallahi AE, Prins C, Wolfler Calvo R. "A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem". *Computers & Operations Research*, 35(5), 1725-1741, 2008.
- [2] Alinaghian M, Shokouhi N. "Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search". *Omega*, 76, 85-99, 2018.
- [3] Reed M, Yiannakou A, Evering R. "An ant colony algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem". *Applied Soft Computing*, 15, 169-176, 2014.
- [4] Silvestrin P V, Ritt M. "An iterated tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem". *Computers & Operations Research*, 81, 192-202, 2017.
- [5] Abdulkader M M S, Gajpal Y, ElMekkawy T Y. "Hybridized ant colony algorithm for the Multi Compartment Vehicle Routing Problem". *Applied Soft Computing*, 37, 196-203, 2015.
- [6] Kaabachi I, Yahyaoui H, Krichen S, Dekdouk A. "Measuring and evaluating hybrid metaheuristics for solving the multi-compartment vehicle routing problem". *Measurement*, 141, 407-419, 2019.
- [7] Muyldermans L, Pang G. "On the benefits of co-collection: Experiments with a multi-compartment vehicle routing algorithm". *European Journal of Operational Research*, 206(1), 93-103, 2010.
- [8] Efthymiadis S, Liapis N, Nenes G. "Solving a heterogeneous fleet multi-compartment vehicle routing problem: a case study". *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10(1), 1-15, 2023.
- [9] Mendoza J E, Castanier B, Guéret C, Medaglia A L, Velasco N. "A memetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands". *Computers & Operations Research*, 37(11), 1886-1898, 2010.
- [10] Mendoza J E, Castanier B, Guéret C, Medaglia A L, Velasco N. "Constructive heuristics for the multicompartment vehicle routing problem with stochastic demands". *Transportation Science*, 45(3), 346-363, 2011.
- [11] Goodson J C. "A priori policy evaluation and cyclic-order-based simulated annealing for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands". *European Journal of Operational Research*, 241(2), 361-369, 2015.
- [12] Chajakis E D, Guignard M. "Scheduling deliveries in vehicles with multiple compartments". *Journal of Global Optimization*, 26(1), 43-78, 2003.
- [13] Hübner A, Ostermeier M. "A multi-compartment vehicle routing problem with loading and unloading costs". *Transportation Science*, 53(1), 282-300, 2019.
- [14] Ostermeier M, Martins S, Amorim P, Hübner A. "Loading constraints for a multi-compartment vehicle routing problem". *OR Spectrum*, 40(4), 997-1027, 2018.
- [15] Martins S, Ostermeier M, Amorim P, Hübner A, Almada-Lobo B. "Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem". *European Journal of Operational Research*, 276(3), 893-909, 2019.
- [16] Henke T, Speranza MG, Wäscher G. "The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes". *European Journal of Operational Research*, 246(3), 730-743, 2015.
- [17] Derigs U, Gottlieb J, Kalkoff J, Piesche M, Rothlauf F, Vogel U. "Vehicle routing with compartments: applications, modelling and heuristics". *OR Spectrum*, 33(4), 885-914, 2011.
- [18] Shang C, Ma L, Liu Y. "Green location routing problem with flexible multi-compartment for source-separated waste: A Q-learning and multi-strategy-based hyper-heuristic algorithm". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 1-17, 2023.
- [19] Wang X, Liang Y, Tang X, Jiang X. "A multi-compartment electric vehicle routing problem with time windows and temperature and humidity settings for perishable product delivery". *Expert Systems with Applications*, 233, 1-16, 2023.
- [20] Henke T, Speranza MG, Wäscher G. "A branch-and-cut algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes". *Annals of Operations Research*, 275(2), 321-338, 2019.
- [21] Kiilerich L, Wøhlk S. "New large-scale data instances for CARP and new variations of CARP". *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56(1), 1-32, 2018.
- [22] Zbib H, Laporte G. "The commodity-split multi-compartment capacitated arc routing problem". *Computers & Operations Research*, 122, 1-18, 2020.

- [23] Caramia M, Guerriero F. "A milk collection problem with incompatibility constraints". *Interfaces*, 40(2), 130-143, 2010.
- [24] Oppen J, Løkketangen A. "A tabu search approach for the livestock collection problem". *Computers & Operations Research*, 35(10), 3213-3229, 2008.
- [25] Sethanan K, Pitakaso R. "Differential evolution algorithms for scheduling raw milk transportation". *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 245-259, 2016.
- [26] Polat O, Topaloğlu D. "Milk collection network design in a fuzzy environment in" *18th International Conference on Economy & Business*. Burgas, Bulgaria, 20-24 August 2019.
- [27] Polat O, Kalaycı C B, Bilgen B, Topaloğlu D. "An integrated mathematical model for the milk collection problem". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(9), 1087-1096, 2019.
- [28] Popović D, Vidović M, Radivojević G. "Variable neighborhood search heuristic for the inventory routing problem in fuel delivery". *Expert Systems with Applications*, 39(18), 13390-13398, 2012.
- [29] Benantar A, Ouafi R, Boukachour J. "A petrol station replenishment problem: new variant and formulation". *Logistics Research*, 9(1), 1-18, 2016.
- [30] Cornillier F, Laporte G, Boctor F F, Renaud J. "The petrol station replenishment problem with time windows". *Computers & Operations Research*, 36(3), 919-935, 2009.
- [31] Coelho L C, Laporte G. "Classification, models and exact algorithms for multi-compartment delivery problems". *European Journal of Operational Research*, 242(3), 854-864, 2015.
- [32] Dantzig G, Fulkerson R, Johnson S. "Solution of a large-scale traveling-salesman problem". *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), 393-410, 1954.
- [33] Karaboga D. "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization". Erciyes University, Engineering Faculty, Computer, Report, Technical Report-TR06, 2005.
- [34] Yang XS. *Engineering Optimizations via Nature-Inspired Virtual Bee Algorithms*. in *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach*. 2005. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [35] Irani R, Nasimi R. "Application of artificial bee colony-based neural network in bottom hole pressure prediction in underbalanced drilling". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(1), 6-12, 2011.
- [36] Szeto WY, Wu Y, Ho SC. "An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem". *European Journal of Operational Research*, 215(1), 126-135, 2011.
- [37] Zhang S, Lee CKM, Choy KL, Ho W, Ip WH. "Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 85-99, 2014.
- [38] Ng KKH, Lee CKM, Zhang SZ, Wu K, Ho W. "A multiple colonies artificial bee colony algorithm for a capacitated vehicle routing problem and re-routing strategies under time-dependent traffic congestion". *Computers & Industrial Engineering*, 109, 151-168, 2017.
- [39] Kaya E, Gorkemli B, Akay B, Karaboga D. "A review on the studies employing artificial bee colony algorithm to solve combinatorial optimization problems". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 1-30, 2022.
- [40] Mladenovic N, Hansen P. "Variable neighborhood search". *Computers & Operations Research*, 24(11), 1097-1100, 1997.
- [41] Hansen P, Mladenović N. "Variable neighborhood search: Principles and applications". *European Journal of Operational Research*, 130(3), 449-467, 2001.
- [42] Hansen P, Mladenović N, Moreno Pérez J. "Variable neighbourhood search: methods and applications". *Annals of Operations Research*, 175(1), 367-407, 2010.
- [43] Crispim J, Brandao J. "Reactive tabu search and variable neighbourhood descent applied to the vehicle routing problem with backhauls". *4th Metaheuristic International Conference*, Porto, Portugal, 16-20 July 2001.
- [44] Kytöjoki J, Nuortio T, Bräysy O, Gendreau M. "An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems". *Computers & Operations Research*, 34(9), 2743-2757, 2007.
- [45] Fleszar K, Osman I H, Hindi K S. "A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem". *European Journal of Operational Research*, 195(3), 803-809, 2009.
- [46] Kuo Y, Wang C-C. "A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost". *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6949-6954, 2012.
- [47] Stenger A, Vigo D, Enz S, Schwind M. "An adaptive variable neighborhood search algorithm for a vehicle routing problem arising in small package shipping". *Transportation Science*, 47(1), 64-80, 2013.
- [48] Salhi S, Imran A, Wassan N A. "The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation". *Computers & Operations Research*, 52, Part B(0), 315-325, 2014.
- [49] Hemmelmayr VC, Doerner KF, Hartl RF. "A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems". *European Journal of Operational Research*, 195(3), 791-802, 2009.
- [50] Pirkwieser S, Raidl G, *Multiple Variable Neighborhood Search Enriched with ILP Techniques for the Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows*, in *Hybrid Metaheuristics*, M. Blesa, et al., Editors: Springer Berlin Heidelberg, 45-59, 2009.
- [51] Polat O, Kalaycı C B, Kulak O, Günther HO. "A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Time Limit". *European Journal of Operational Research*, 242(2), 369-382, 2015.
- [52] Polat O. "Cooperative variable neighborhood search for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 4(9), 137-140, 2016.
- [53] Kalaycı C B, Kaya C. "An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". *Expert Systems with Applications*, 66, 163-175, 2016.

- [54] Polat O. "A parallel variable neighborhood search for the vehicle routing problem with divisible deliveries and pickups". *Computers & Operations Research*, 85, 71-86, 2017.
- [55] Beasley J E. "Route first-cluster second methods for vehicle routing". *Omega*, 11(4), 403-408, 1983.
- [56] Chen J, Shi J. "A multi-compartment vehicle routing problem with time windows for urban distribution – A comparison study on particle swarm optimization algorithms". *Computers & Industrial Engineering*, 133, 95-106, 2019.
- [57] 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.
- [58] Gillett B E, Miller L R. "A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem". *Operations Research*, 22(2), 340-349, 1974.
- [59] Prins C. "A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem". *Computers & Operations Research*, 31(12), 1985-2002, 2004.
- [60] Wang L, Kinable J, Van Woensel T. "The fuel replenishment problem: A split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips". *Computers & Operations Research*, 118, 1-16, 2020.
- [61] Wang Q, Ji Q, Chiu C-H. "Optimal routing for heterogeneous fixed fleets of multicompartment vehicles". *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-12, 2014.
- [62] Chen L, Liu Y, Langevin A. "A multi-compartment vehicle routing problem in cold-chain distribution". *Computers & Operations Research*, 111, 58-66, 2019.
- [63] Jiang J, Ng KM, Poh K L, Teo KM. "Vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows". *Expert Systems with Applications*, 41(8), 3748-3760, 2014.
- [64] Solomon MM. "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints". *Operations Research*, 35(2), 254-265, 1987.