

PhD Research Article / Doktora Çalışması Araştırma Makalesi
**A HYBRID ALGORITHM WITH GENETIC ALGORITHM AND ANT COLONY
OPTIMIZATION FOR SOLVING MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING
PROBLEMS**

G. Nilay YÜCENUR*, **Nihan ÇETİN DEMİREL**

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Received/Geliş: 23.05.2011 Accepted/Kabul: 29.06.2011

ABSTRACT

Vehicle routing problems are a very important issue for the logistics sector. Vehicle routing problems have various types such as time windows, multiple-depot, stochastic demand, backhauls, simultaneous delivery and pick up, distance constraint...etc. The objectives of all these problems are to design optimal routes minimizing total traveled distance, minimizing number of vehicles which are used for the solution that satisfy corresponding constraints. In this study, for the solution of the multi-depot vehicle routing problem, a new hybrid metaheuristic structure is proposed with ant colony optimization and genetic algorithm. The aim of the problem is to minimize the total traveled distance by all vehicles. The metaheuristic structure of the multi-depot vehicle routing problem solution consists of two phases. In the first phase for grouping Thangiah and Salhi's (2001) genetic clustering method is developed and in the second phase for routing Gambardella and Dorigo's (1997) ant colony system approach is used. The proposed metaheuristic method is tested with the Cordeau et al.'s (1997) problem sets and the results are compared with the other solution techniques in the literature.

Keywords: Multi-depot vehicle routing problems, genetic algorithm, ant colony optimization, genetic clustering.

**ÇOK DEPOLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN GENETİK
ALGORİTMA VE KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONUNDAN OLUŞAN MELEZ
ALGORİTMA TASARIMI**

ÖZET

Lojistik sektöründe önemli bir yer tutan araç rotalama problemlerinin zaman pencereli, çok depolu, stokastik talepli, geri dönüşlü, eşzamanlı dağıtım ve toplama, mesafe kısıtlı... vb. gibi türleri vardır. Tüm bu problemlerde amaç toplam seyahat mesafesini ve çözümde kullanılan toplam araç sayısını minimize ederek problemde var olan kısıtları da göz önüne alarak optimum rotaları tasarlamaktır. Bu çalışmada, çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için genetik algoritmanın (GA) ve karınca kolonisi optimizasyonunun (KKO) bir arada kullanılmasıyla oluşturulan melez metasezgisel bir yapı önerilmiştir. Problemden amaç tüm araçlar tarafından kat edilen toplam seyahat mesafesinin minimize edilmesidir. Çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için önerilen bu metasezgisel yapı iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamadaki gruplama işlemi için GA, Thangiah ve Salhi'nin 2001 yılında ortaya koydukları genetik kümeleme yönteminin geliştirilmiş hali ile kullanılmıştır. İkinci aşamadaki rotalama işlemi ise KKO algoritmalarından Gambardella ve Dorigo tarafından 1997 yılında önerilen karınca kolonisi sistemi yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Ortaya konan yeni melez yöntem literatürde kabul gören Cordeau vd.'nin (1997) önerdikleri problem setleri ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar var olan diğer yöntem çözümleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Çok depolu araç rotalama problemi, genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, genetik kümeleme.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: nserbest@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 29 21

1. GİRİŞ

Globalleşen dünya pazarı ve artan rekabet ile işletmelerinin yaşamlarını sürdürebilmeleri oldukça zorlaşmıştır. Aynı sektörde faaliyet gösteren benzer hizmetleri, benzer kalitede sunabilen işletmeler rekabet ortamında bir adım öne geçebilmek için daha düşük maliyette ürün sunma yoluna gitmektedirler. Lojistik sektöründe işletmeleri rakipleri karşısından bir adım öne geçirecek olan sistem maliyetin az olmasını sağlayan, aracın kat ettiği yolun en kısa olmasını sağlamaktır. Bu noktada karşımıza çıkan durum, literatürde araç rotalama problemleri olarak yer almakta ve oldukça geniş çaplı olarak araştırılmaktadır.

Genellikle depodan başlayarak tüm müşterilere en kısa zamanda ve minimum maliyetle hizmet sunabilmesini sağlayan optimum rotanın çizilmesi araç rotalama problemlerinin temelidir. Çok uzun yıllardır araştırılmasına rağmen araç rotalama problemleri için çizilmesi gereken bu optimum rotayı veren matematiksel kesin bir formül bulunamamıştır. Bu nedenle problem çeşidinin kısıt ve özelliklerine göre sezgisel ve metasezgisel yöntemler araç rotalama problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmış ve elde ettikleri sonuçlarla da bu alanda kullanılmalarına devam edilmiştir. Bu çalışmada da optimizasyon problemlerine ışık tutan iki metasezgisel yöntem GA ve KKO bir araya getirilerek oluşturacak melez algoritma ile çok depolu araç rotalama problemlerine çözüm aranacaktır.

Literatüre bakıldığında GA ve KKO yöntemleri Silva ve diğerleri (2008) tarafından lojistik çizelgeleme probleminin online olarak yeniden optimize edilmesinde, Tseng ve Chen (2006) tarafından kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi için ANGEL adında melez bir metasezgiselin önerilmesinde, Gaertner ve Clark (2005) tarafından karınca koloni algoritmasının parametre ayarlamalarının analiz edilmesinde, Chaharsooghi ve Kermani (2008) tarafından çok amaçlı kaynak atama probleminde Pareto çözüm setinin oluşturulmasında ve Lee ve diğerleri (2008) tarafından çoklu ardışık sıralama probleminin çözümünde kullanılmış fakat çok depolu araç rotalama problemlerinin çözümü için bu iki yöntem bir araya getirilmemiştir [1, 2, 3, 4, 5].

Bu çalışma, GA ile KKO'nun bir araya getirilmesi ile oluşturulan melez yapı ile literatürde daha önce uygulanmadığı bir alan olan çok depolu araç rotalama probleminin çözümünde kullanılması açısından ilk olma niteliğindedir. İyi sonuçlar elde edebilmek için işbirliği yapan yapay karıncalardan oluşan KKO ve rastlantısal arama tekniklerini kullanarak çözüm bulmaya çalışan, değişken kodlama esasına dayanan metasezgisel arama tekniği GA'dan oluşan çalışmanın ilk bölümünde araç rotalama problemlerinin incelenmesinin ardından melez yapıyı oluşturan sezgisel yöntemler kısaca tanımlanmış ve oluşturulan yapı açıklanarak melez algoritmanın uygulama adımlarının açıklanması ve uygulamanın gerçekleştirilmesi ile de sonuç bölümünde elde edilen çözümler literatürde var olan bilinen en iyi sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Araç rotalama problemi (ARP) en basit tanımıyla, bir merkezde bulunan araçların, talepleri bilinen müşteri kümesine hizmet edip tekrar merkeze dönmesini sağlayacak en kısa rotaların bulunması problemidir [6]. İlk kez 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından tanımlanan araç rotalama problemi günümüze kadar üzerinde en çok durulan problem çeşitlerinden birisi olmuştur. Klasik araç rotalama probleminde, aynı tip ve kapasiteye sahip olan homojen bir araç filosu, merkezi bir depodan hareket ederek talepleri önceden bilinen bir grup müşteriye hizmet vermektedir. Bu problemde, her müşteri sadece bir araçtan hizmet almakta ve her araç sadece bir rota izlemektedir. Araçlar için kapasite kısıtının yanı sıra, araçların depodan hareket edip rotanın sonunda depoya geri dönmesi zorunluluğu vardır [7]. Tipik bir araç rotalama probleminde, depodan başlayarak belirli sayıda müşteriye gezen ve ardından tekrar depoya dönen belirli koşullar altında toplam yolculuk maliyetini minimize eden rotalar kümesinin bulunması amaçtır [8].

Araç rotalama problemleri çeşitli kısıtlara ve özelliklere göre birçok sınıfa

ayrılmaktadırlar. Araç rotalama problemlerinin temel türleri dinamik ve statik, açık uçlu ve kapalı uçlu, kapasite kısıtlı, mesafe kısıtlı, zaman pencereli, karışık ve eşzamanlı toplama ve dağıtım, geri dönüşlü, parçalı dağıtım, periyodik ve karma yüklemeli, tek ve çok depolu ve stokastik araç rotalama problemleri olarak sıralanabilir [9, 10, 11, 12, 13].

Klasik bir araç rotalama problemi modelinde $G = (V, E)$ bir grafi, $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ bir nokta kümesini ve $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ kenar kümesini gösterdiği varsayılırsa V kümesinde, v_0 merkez depoyu, n ise müşterileri ifade eder. Klasik araç rotalama probleminde her müşteri q_i talebine sahiptir ve depoda her biri C kapasiteli m araçtan oluşan bir araç filosu vardır. Bu problemlerde temel amaç varolan kısıtlara uyulması ile maliyet minimizasyonunu sağlayarak tüm müşterilere hizmet götürmek için her aracın gideceği yolu çizmek yani m araç sayısı kadar rota belirleyebilmektir. Tek depolu klasik bir araç rotalama probleminin doğrusal modeli aşağıda verildiği gibidir [14]:

M : Araç sayısı

N : Müşteri sayısı

d_{ij} : i noktası ile j noktası arasındaki mesafe

q_i : i müşterisinin talep miktarı

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ noktasından } j \text{ noktasına hareket ederse} \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases}$$

$$\text{Amaç fonksiyonu: } \min Z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N \sum_{k=1}^M d_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

Şu kısıtlara göre:

$$i = 0 \text{ için } \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ijk} = M \quad (2)$$

$$i \in \{1, \dots, N\} \text{ için } \sum_{k=1}^M \sum_{j=0, j \neq i}^N X_{ijk} = 1 \quad (3)$$

$$j \in \{1, \dots, N\} \text{ için } \sum_{k=1}^M \sum_{i=0, i \neq j}^N X_{ijk} = 1 \quad (4)$$

$$k \in \{1, \dots, M\} \text{ için } \sum_{i=1}^N X_{i0k} \leq 1 \quad (5)$$

$$k \in \{1, \dots, M\} \text{ için } \sum_{i=1}^N q_i \sum_{j=0, j \neq i}^N X_{ijk} \leq C \quad (6)$$

Burada Denklem (1)'de amaç fonksiyonu yer almakta ve bu denklem toplam kat edilecek mesafenin yani maliyetin minimize edilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Öte yandan Denklem (2) işletme biriminden çıkacak araç sayısının M adet olduğunu belirtirken, (3) bir müşterinin sadece bir araç tarafından ziyaret edilmesi gerektiğini ve (4) ise müşteriye gelen ve müşteriden çıkan yollardan sadece bir tanesinin kullanılmasının zorunlu olduğunu ifade etmektedir. Denklem (5)'e göre bir araç yalnızca bir defa işletme biriminden çıkacağından aynı araç sadece bir defa rotalamada kullanılmaktayken, (6)'ya göre ise araçlara yapılan yüklemeler araç kapasite değeri olan C 'yi geçemez.

Bir araç rotalama probleminin çözümünün elde edilmesi için optimize edilecek olan problem fonksiyonu, müşteriler arası ve müşteriler ile işletme birim/birimleri arası mesafeler,

müşteri noktalarında bulunan talep miktarları ve rotalamada kullanılacak araç sayısı ile bu araçların kapasite bilgileri bilinmelidir. Araç rotalama problemleri için önerilen çözüm yöntemleri kesin yöntemler ve sezgisel yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılır.

Araç rotalama problemlerinin çözümünde kullanılan kesin yöntem algoritmaları yol formülasyonu temellidir. Araç rotalama problemi için çözümün araştırılmasında önemli ve başarılı etkileri olan bu yöntemler dal ve sınır, dal ve kesme, kesme düzlemi, sütun üretme, dal ve değer algoritması ve dinamik programlama olarak sıralanabilir [15, 16, 17].

Sezgisel algoritmalar ise herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için çeşitli alternatif hareketlerden etkili olanlara karar vermek amacı ile kriterler veya bilgisayar metodlarıdır. Araç rotalama problemlerine çözüm arayan bu yöntemler klasik sezgisel algoritmalar ve metasezgisel yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Klasik sezgisel algoritmalar genel olarak mümkün olmayan atamalarla çözüme başlayan ve her defasında iki düğüm arasına bir dal ekleyerek mümkün çözüme ulaşan tur kurucu, bir mümkün çözümü başlangıç çözümü olarak alan ve o çözümü geliştiren tur geliştirici ve birinci aşamasında atamanın ikimci aşamasında da rotalamanın yapıldığı iki aşamalı sezgiseller olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [18, 19, 20, 12]. Metasezgisel yöntemler ise araç rotalama problemleri gibi karmaşık yapıdaki kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiş özel sezgisellerdir. Klasik sezgisellere nazaran çözüm uzayının araştırılmasında daha etkili olduğu bilinen metasezgisel yöntemler, genel olarak aşağıda verilen üç temel alana ayrılırlar [20]:

- *Yerel arama:* Tavlama benzetimi, deterministik tavlama ve tabu arama tarafından içerilir.
- *Popülasyon arama:* Genetik algoritma ve uyarlamalı hafıza prosedürü tarafından içerilir.
- *Öğrenme mekanizması:* Sinir ağları ve karınca kolonisi optimizasyonu tarafından içerilir.

3. MEZEL YAPIYI OLUŞTURAN GENETİK ALGORİTMA VE KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU METASEZGİSELLERİ

Önerilen melez yapı birbiri ile uyumlu olarak çalışan iki metasezgisel yöntemden oluşur. Bu yapıya göre GA, optimizasyon probleminin çözümü için üreteceği rassal başlangıç çözümünün ardından tüm operatörleri ile yürütülerek genetik algoritmanın durma kuralı ile ulaşılan sonuç popülasyonu KKO'na vererek probleme nihai bir sonuç aranmasını sağlayacaktır. Bu noktada kurulacak olan melez algoritma, GA temelinde başlatılarak elde ettiği sonucu işlemesi, geliştirmesi ve sonlandırması için KKO'na verecektir.

3.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, uyarlanabilir sezgisel arama algoritmalarıdır. Bu algoritmalar, genetik ve doğal seleksiyonu temel alan evrimsel algoritmaların başını çekmektedirler. GA temel olarak evrimsel sistemin doğal işleyişini canlandırabilecek şekilde biçimlendirilmiş olup, problem çözümlerinin genetik sunumu, çözümlerin başlangıç popülasyonunun yaratılma yolu, sahip oldukları uygunluklara göre çözümleri sıralayan değerlendirme fonksiyonu, tekrar üreme boyunca yavruların genetik bileşimlerinin değiştirilmesinde kullanılan genetik operatörler ve genetik algoritmanın değişkenleri için değerler olarak gruplanabilen beş temel bileşeni içerir [21, 22].

GA prensibi, esinlendiği doğal seçim ilkesine uygun olarak, problemin çözümü olabilecek mümkün alternatifler kümesini, var olan tasarım sınırlayıcıları ve koşulları altında hayatta kalmak için mücadele eden canlı topluluklarına benzetir. En iyinin hayatta kalmasının hedeflendiği bu benzetimde, GA en uygun çözüme ulaşan stokastik ve global bir optimizasyon yöntemidir [23]. Depolanmış bilgi, hedefe giden yollar ve çözümler için arama yapan bir teknik olan GA hesapları parametre değerlerinden çok kodlanmış parametreler temellidir, yerel

optimuma yakalanmaktan kaçınarak yüksek paralel arama yeteneğini ortaya çıkarır ve hesaplanmak zorunda olan uygunluk fonksiyonu dışında karmaşık matematiksel formüller içermez [24].

Çözümün kendisi yerine çözüm setleriyle çalışması, tekil çözümler yerine çözümler topluluğunda arama yapması, yardımcı ek bilgiler yerine uygunluk fonksiyonunu kullanması ve deterministik kurallar yerine stokastik kurullarla çalışması nedeniyle diğer geleneksel optimizasyon yöntemlerinden ve arama prosedürlerinden ayrılan GA ile ilgili Jeon ve diğerleri (2007) çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için melez bir yapı önerirken, Bae ve diğerleri (2007) yine aynı problem türünün çözümü için çok depolu sistem için birleştirilmiş GA ile araç rotalama problemi yaklaşımını kullanmışlardır. Wang ve Lu (2009) kapasiteli araç rotalama probleminin çözümü için melez bir GA yaklaşımını önerirken, Alba ve Dorronsoro (2006) araç rotalama probleminin hücreli GA yapısı ile çözüm bulmaya çalışmışlardır. Cheng ve Wang (2009) ise zaman pencereli araç rotalama probleminin çözümü için ayrıştırma tekniğini ve GA'yı kullanmışlardır [25, 26, 24, 27, 28].

3.1. Karınca Kolonisi Optimizasyonu

Gerçek karıncaların beslenme davranışlarından ilham alan bir yöntem olan KKO, gerçek yaşamdaki karınca koloni davranışlarının matematiksel modelleri üzerine dayalı bir algoritmadır. Bu noktada, algoritmanın temelini oluşturan düşünce karıncaların yuvalarından bir gıda kaynağına giden en kısa yolu, herhangi bir görsel ipucu kullanmadan bulma yeteneğine sahip olmalarıdır.

Bir grafik üzerinde bulunan şehirlerin birinden diğerine hareket eden gezgin satıcı probleminin çözümleri yapay karıncalar ile inşa edilir. Algoritma adımları durdurma kuralı olan maksimum sayıdaki iterasyona (t_{max}) ulaşana kadar devam ettirilir. Her bir iterasyon boyunca m tane karınca, olasılıksal karar kuralı ile n adımda tur oluşturur. Uygulamada, bir karınca i şehirden j şehrine hareket etmeyi seçerse, (i,j) yayı tur yapısına dahil edilir. Bu adım karınca, turunu tamamlayana kadar devam ettirilir. Karınca sisteminde tüm karıncaların turlarını tamamlamasının ardından, her bir karınca ziyaret ettikleri yaylara feromon maddesi bırakırlar. Feromon maddesinin bırakılması işlemi feromonun buharlaşma prosedürünü takiben yapılır [29]. Karınca sisteminde, her bir karınca belli bir hafızaya sahiptir. Bu hafıza karıncanın ziyaret ettiği şehirleri içerir ve tabu listesi olarak adlandırılan bu hafıza, her bir k karıncası için, ziyaret ettiği şehirleri tanımlar ve ziyaret edilmiş şehirlerin tekrar ziyaretini önler.

Literatüre bakıldığında Donati ve diğerleri (2008) zamana bağımlı araç rotalama probleminin çözümü için çoklu karınca kolonisi sistemini önermişlerdir. Mazzeo ve Loiseau (2004) kapasiteli araç rotalama problemi için karınca kolonisi algoritmasını kullanırken, Chen ve Ting (2005) zaman pencereli araç rotalama probleminin çözümü için yine aynı yöntemi önermişlerdir. Gajpal ve Abad (2009b) araç rotalama probleminin çözümü için çoklu karınca sistemini kullanırken, Fuellerer ve diğerleri (2009) iki boyutlu yüklenen araç rotalama, Gajpal ve Abad (2009a) eş zamanlı dağıtım ve toplamalı araç rotalama problemlerinin çözümü için karınca kolonisi sistemini önermişlerdir [30, 11, 31, 32, 33, 13].

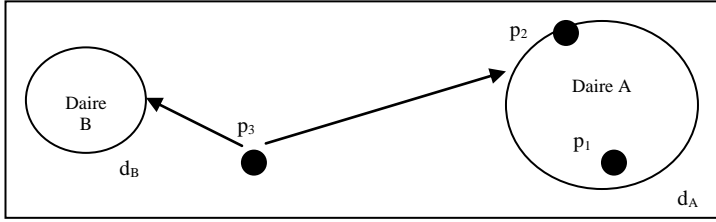
4. ÇOK DEPOLU ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN MODELLENMESİ VE ÇÖZÜMÜ İÇİN MELEZ METASEZGİSEL ALGORİTMA

Bu çalışma kapsamında çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için kurulan melez yapıda iki aşamalı bir yöntem önerilmiş ve literatürde var olan genetik kümeleme yöntemi çok depolu araç rotalama probleminin birinci aşamasında müşterilerin depolara gruplanması için kullanılmış, problemin ikinci aşamasında ise rotalama işlemi gerçekleştirilmek için KKO'dan yararlanılmıştır. Ortaya konan melez yapı literatürde var olan problem setleriyle test edilmiştir. Bu problem setleri Christofides ve Eilon tarafından 1969 yılında literatüre kazandırılmış olup literatürdeki birçok

önerilen yöntemin test edilmesinde ve bu yöntemlerin gerçekliklerinin sınanmasında kullanılmıştır. Literatürde yer alan bu problem setlerinde sayıları 50 ile 360 arasında değişen müşteriler, 2 ile 9 arasında değişen depolar vardır ve problem setlerinde kullanılan araçların kapasiteleri 80 ile 500 arasında değişir.

Önerilen çözüm yaklaşımı iki aşamadan oluşmuş ve önce grupla sonra rotala prosedürü kullanılmıştır. Çözüm yaklaşımının birinci aşamasında hangi müşterilerin hangi depolardan hizmet alacağına belirlendiği gruplama işlemi yapılırken, ikinci aşamada ise hangi depodan hizmet alacağı belirlenmiş olan müşterilerin o depo içinde rotalanması gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşama (gruplama): Çalışmada gruplama işlemi Thangiah ve Salhi'nin 2001 yılında ortaya koydukları genetik kümeleme yönteminin maliyet fonksiyonundan ayrılarak geliştirilmiş hali ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde koordinat düzlemindeki konumları belirli olan müşteriler ve depolar düzleme yerleştirilir. Thangiah ve Salhi (2001) tarafından önerilen yöntemde olduğu gibi depolardan rastlantısal olarak belirlenen çaplar ile müşterileri kapsayan ve birbirini kesmeyen daireler çizilir [34]. Buna göre, bir müşteri ya bir dairenin içinde olabilir, ya bir dairenin üzerinde ya da dairenin dışında olabilir. Bu işlem örnek olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. p_1 , p_2 ve p_3 müşterilerinin A ve B daireleri ile olan ilişkisi

Şekilde p_1 , p_2 ve p_3 şeklinde ifade edilen üç tane müşteri ve A ve B şeklinde ifade edilen iki adet depo vardır. Üç müşterinin iki depoya dağıtımı için depo sayısı kadar yani iki tane daire çizilir. Bu daireler birbirini kesmez. Şekile göre, p_1 müşterisi A deposundan hizmet alır çünkü A dairesinin içindedir; p_2 müşterisi de yine A deposundan hizmet alır çünkü A dairesinin üzerindedir. p_3 müşterisinin ise hangi depodan hizmet göreceği bilinmemektedir. Çünkü müşteri ne A dairesinin ne de B dairesinin içindedir. Bu noktada p_3 müşterisinin hangi depodan hizmet alacağına belirlenmesi için müşterinin her iki dairenin çevrelerine olan uzaklıkları ölçülür ve p_3 müşterisi hangi daireye daha yakınsa bu müşteri o depoya atanır. Yani p_3 müşterisi ile A dairesinin kenarı arasındaki mesafe d_A ve B dairesinin kenarı arasındaki mesafe d_B ise, p_3 müşterisi $d_A \leq d_B$ olduğunda A deposuna, $d_B < d_A$ olduğunda ise B deposuna atanır.

Müşterilerin depolara genetik kümeleme yöntemi ile gruplanmasının ardından GA adımları işletilmeye başlanır. Müşteriler depolara gruplanır. Depo sayısına k dersek 2^k adet depoların sıralanma kombinasyonu elde edilir ve böylelikle popülasyon havuzu oluşturulur. Her bir popülasyon için amaç fonksiyonu olan ve toplam seyahat mesafesinin minimizasyonunun arandığı uygunluk değeri hesaplanır. Uygunluk değerlerine göre belirlenen bireyler arasında sırasıyla GA operatörleri çalıştırılır. İkili (binary) şekilde kodlanan popülasyondan rulet tekeri seçimi ile çaprazlamaya sokulacak bireyler belirlenir ve popülasyona dairesel çaprazlama operatörü ve çaprazlama işleminin ardından komşu iki geni değiştirme mutasyon operatörü çalıştırılır. Mutasyon işleminin ardından da yeniden uygunluk değeri hesaplanır. Eğer GA durma kuralına yani üretilen maksimum nesil sayısına ulaşırsa elde edilen küme rotalama işlemi için KKO yöntemine verilir.

İkinci aşama (rotalama): Bu aşamada KKO kullanılır. KKO ile karıncaların çözüm aradıkları grupları oluşturan ve daha basit bir şekilde çözüme ulaşılmasını sağlayan aday listeleri

en yakın komşu sezgiseli kullanılarak ve araç kapasiteleri göz önüne alınarak oluşturulur. Her aday listesi mutlaka bir depo içerir ve listeler araçların güzergahına uygun olarak bir depodan başlar ve yine aynı depoda sona erer.

Aday listelerinin oluşturulmasının ardından karınca koloni sistemi kullanılarak rotalama işlemi gerçekleştirilir. Karınca koloni sisteminde müşteri sayısı kadar karınca depoda bulundurulur. Tabu listesi olarak, her bir karıncanın ziyaret ettiği şehirleri gösteren bir yasaklar listesi oluşturulur. Bu listede yer alan müşterileri karınca tekrar ziyaret edemeyeceğinden, karıncaların aynı müşteriye birden fazla ziyaret etmeleri bu sayede engellenmiş olur. Karıncanın tabu listesi başlangıçta boştur. Müşteri sayısı kadar karıncanın depoda konumlandırılmasının ardından aday listesindeki müşterilerin birbirleriyle ve depo ile aralarındaki tüm bağlantı yollarına başlangıç feromon değeri atanır. Başlangıç feromon değeri, depodan başlanarak aday listesindeki tüm müşterilerin en yakın komşu müşterisi şeklinde belirlenen tur uzunluğundan hesaplanır. Başlangıç feromon değeri tüm şehirler ve şehirlerle depo arasındaki yollara yapıştırılır. Başlangıç feromon değerinin belirlenmesinden sonra depodaki karıncalar rastlantısal olarak şehirlere yerleştirilir. Karınca koloni sisteminde şehirlerde bulunan karıncalar gidecekleri bir sonraki müşteriye sözde-rastlantısal-orantılı-durum kuralı ile seçerler. Karınca bir sonraki müşteriye geldiğinde, ziyaret ettiği bir önceki müşteri aday listesinden çıkarılır ve aynı şehrin tekrar ziyaret edilmesini engelleyen yasaklı şehirlerin bulunduğu tabu listesine eklenir. Karınca bundan sonra yoluna yukarıdaki anlatıldığı şekilde devam eder ve tüm müşteriler ziyaret edilene yani tabu listesi başlangıçtaki aday listesine eşit oluncaya kadar işlemler tekrarlanır. İşlemler bittiğinde aday listesi boş küme olur. Karınca tüm müşterileri dolaştıktan ve tabu listesini doldurduktan sonra seyahatinde kullandığı en kısa yolların üzerine bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere gerekli koku maddesini yani feromonu bırakır. Çalışmada feromon güncellemesi her karınca turunu tamamladıktan sonra global olarak yapılır. Global feromon güncellemesinde, karıncaların gerçekleştirdikleri turlar uzunluklarına göre sıralanır ve sadece en kısa turu yapan karıncanın geçtiği yollardaki bağlantılar üzerinde feromon güncellemesi yapılır. Feromon güncellemesi ile karıncalar bir sonraki iterasyon için yeniden başlangıç noktasına yani depoya getirilirler. Karıncalar durma kuralı olan ve başlangıçta belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşana kadar tüm açıklanan işlemleri tekrar ederler. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasının ardından her aday listesi ve gruplar için sonuç araç rotaları elde edilir.

Çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için önerilen GA ve KKO yaklaşımlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş olan melez yapının pseudo kodu ve Şekil 2’de verilmiştir.

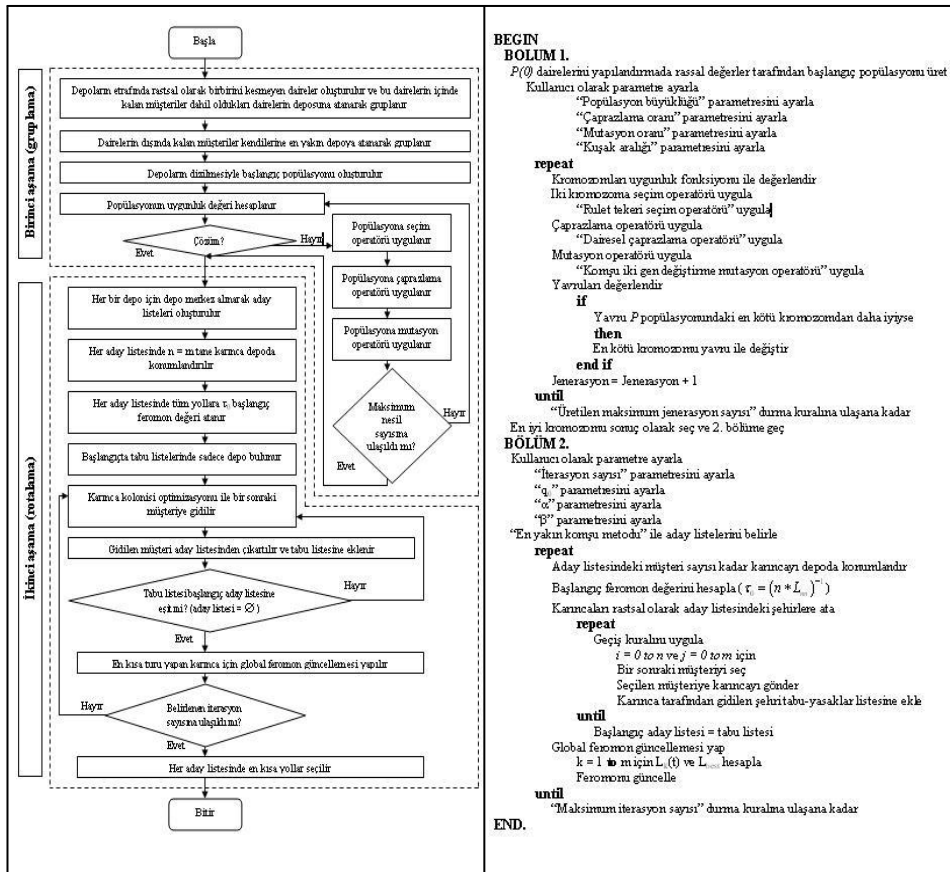
Bu melez yöntemin çözümü için bilgisayar yardımı alınmış ve önerilen çözüm C# programlama dili ile yazılmış, tüm veriler SQL programında muhafaza edilmiştir. Problem, çözüm için Intel® Core™ i7 extreme edition dört çekirdekli, 1 GB® ayrılmış bellekle NVIDIA Quadro FX3800M grafik kartı, 8 GB1333 MHz çift kanallı DDR3 bellek ve 500 GB 7200 RPM harddiske sahip olan bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Çok depolu araç rotalama problemlerinin çözümü için önerilen GA ve KKO’dan oluşan iki aşamalı programın sonuçları elde edilen sonuçların gerçekliğinin test edilmesi ve başarısının ortaya konması için literatürde var olan aynı konu üzerinde yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1’de gösterilen sonuçlara göre önerilen algoritma ile literatürde var olan 23 problem setinin 5 tanesi için bilinen en iyi sonuçlardan daha iyi çözümler elde edilmiş ve önerilen algoritma ile elde edilen çözümlerin %0.30-%3.41 arasında bir oranda sapma gösterdiği belirlenmiştir. Önerilen algoritma ile daha iyi sonuçların elde edildiği problem setleri incelendiğinde bu problem setlerinin orta sayıda müşterisi bulunan ve araç kapasitesinin düşük olduğu problem grupları olduğu gözlenmiştir.

Önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı çalışmalardan Salhi ve Sari (1997) eşzamanlı olarak müşterilerin depolara atanması, dağıtım rotalarının bulunması ve araçların filo bileşimlerinin sınırlandırılması problemlerinin çözülmesi için karmaşık tamsayılı

lineer programlama yöntemi ile kurdukları formülasyonu çok-seviyeli bileşik arama sezgiseli ile çözmüşlerdir [35]. Karşılaştırmanın yapıldığı ve dört problem seti için bilinen en iyi çözümleri veren Cordeau, Gendreau ve Laporte (1997)'nin çalışmasında ise yazarlar periyodik araç rotalama problemi, periyodik gezgin satıcı problemi ve çok depolu araç rotalama probleminin çözümünde tabu arama sezgiselini kullanmış ve çok depolu araç rotalama problemini periyodik araç rotalama probleminin özel bir vak'ası olarak ele alarak problemleri aynı metodoloji ile çözmüşlerdir [36]. Literatürde var olan 23 problem setinden sadece 2.si için bilinen en iyi çözümü sağlayan Thangiah ve Salhi (2001) ise maliyet minimizasyonu amaçlı çok depolu araç rotalama problemlerinin çözümünde kümeleme işlemi için bu çalışmanın temeli olma özelliğini taşıyan geometrik şekilleri kullanmış ve bu geometrik şekillerle elde edilen grupları direkt olarak maliyet fonksiyonuna bağlayarak çok depolu araç rotalama problemleri için çözüm elde etmişlerdir [34]. Son olarak 2007 yılında yaptıkları çalışma ile 23 problem setinin 15 tanesi için bilinen en iyi çözümleri sunan Pisinger ve Ropke ise zaman pencereli araç rotalama problemi, kapasiteli araç rotalama problemi ve çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için tüm problem çeşitlerini toplama ve dağıtım modeline çevirerek komşu aramanın genişletilmiş bir versiyonu olan uyarlanmış geniş komşu arama sezgiselini kullanmışlardır [37].



Şekil 2. Önerilen melez metasezgisel algoritmanın pseudo kodu ve akış diyagramı

Çizelge 1. Elde edilen sonuçların bilinen en iyi sonuçlar ile karşılaştırılması

Problem	Sonuçlar	SS	CGL	TS	PR	Sapma (%)
P01	583.1	587.8	576.9	591.7	576.9	(-1.06)
P02	483.4	484.6	473.9	463.2	473.5	(-4.17)
P03	648.4	645.9	645.2	694.5	641.2	(-1.11)
P04	1023.2	1047.9	1006.7	1062.4	1001.6	(-2.11)
P05	761.6	777.2	753.3	754.8	751.9	(-1.27)
P06	883.9	888.6	877.8	976.0	880.4	(-0.69)
P07	904.6	918.9	891.9	976.5	881.9	(-2.50)
P08	4507.8	4513.3	4482.4	4812.5	4387.4	(-2.67)
P09	3976.9	4005.3	3920.9	4284.6	3874.8	(-2.56)
P10	3727.7	3824.7	3714.7	4291.5	3655.2	(-1.94)
P11	3677.9	3714.3	3580.8	4092.7	3552.3	(-3.41)
P12	1302.2	1326.8	1318.9	1421.9	1318.9	(+1.28)
P13	1302.6	1318.9	1318.9	1318.9	1318.9	(+1.25)
P14	1351.5	1360.1	1360.1	1360.1	1360.1	(+0.63)
P15	2518.8	2586.7	2534.1	3059.2	2505.4	(-0.53)
P16	2561.8	2584.5	2572.2	2719.9	2572.2	(+0.40)
P17	2721.2	2720.2	2720.2	2894.7	2709.1	(-0.44)
P18	3793.3	3853.3	3710.5	5462.9	3727.6	(-2.18)
P19	3825.4	3867.9	3827.1	3956.6	3839.4	(+0.04)
P20	4101.9	4074.8	4058.1	4344.8	4058.1	(-1.06)
P21	5692.8	5788.5	5535.9	6872.1	5519.5	(-3.04)
P22	5732.4	5742.6	5716.0	5985.3	5714.5	(-0.30)
P23	6160.7	6106.6	6139.7	6288.0	6078.8	(-1.32)

SS: Salhi ve Sari (1997); CGL: Cordeau, Gendreau ve Laporte (1997); TS: Thangiah ve Salhi (2001); PR: Pisinger ve Ropke (2007).

5. SONUÇ

Literatürde araç rotalama problemlerini çözmek için geliştirilmiş çok sayıda algoritma mevcuttur. Fakat uzun yıllardır yapılan araştırma çalışmaları ile elde edilen tüm problem yapılarına uygun optimum bir çözüm bulunamadığından bu yöndeki çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu makale çalışması kapsamında da araştırmalar, aynı problem türüne ayrı ayrı uygulanmasına rağmen her iki tekniğin bir arada kullanılarak melez bir algoritma yapısının ortaya konmadığı GA ve KKO ile devam etmiştir.

Çalışmada birden fazla sayıda depodan müşterilere hizmet sunan bir araç rotalama problemi çeşidi olan çok depolu araç rotalama problemi ele alınmış ve önerilen algoritma literatürde var olan bilinen en iyi sonuçlara sahip müşteri sayısı, depo sayısı ve araç kapasitesi özellikleri ile birbirinden farklılaşan 23 problem seti için çalıştırılmıştır.

Önerilen algoritma ile çalıştırılan çözüm prosesi iki aşamadan oluşturularak ilk aşamada gruplama GA ile ikinci aşamada ise rotalama KKO ile belirlenmiştir. Önerilen, çalıştırılan ve kullanıcı arayüzünde bulunan parametre değerlerinin değiştirilmesi ile iyileştirilen çözümler ile literatürde var olan 23 problem setinin 5 tanesi için bilinen en iyi sonuçlardan daha iyi çözümler elde edilmiş ve diğer 18 problem seti için de bilinen en iyi sonuçlara %0.30-%3.41 sapmayla yakın sonuçlar bulunmuştur.

Sonuç olarak, tedarik zinciri içerisinde ve lojistikte önemli bir karar alanı olan taşıma ve ürünlerin müşterilere ulaştırılması konusunda yapılan bu çalışmada GA ve KKO'nun bir araya getirilmesi ile ortaya konan yeni algoritma yapısının orta sayıda müşterisi bulunan ve araç kapasitesinin düşük olduğu problem setleri için iyi çözümler ürettiği ortaya konmuştur.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Silva, C.A., Sousa, J.M.C., Runkler, T.A., “Rescheduling and optimization of logistic processes using GA and ACO”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 3, 343-352, 2008.
- [2] Tseng, L.-Y., Chen S.-C., “A hybrid metaheuristic for the resource-constrained project scheduling problem”, *European Journal of Operational Research*, 175, 707-721, 2006.
- [3] Gaertner, D., Clark, K., “On optimal parameters for ant colony optimization algorithms”, *Proceedings of the 2005 International Conference on Artificial Intelligence*, 1-7 2005.
- [4] Chaharsooghi, S.K., Kermani, A.H.M., “An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP)”, *Applied Mathematics and Computation*, 200, 1, 167-177, 2008.
- [5] Lee, Z.-J., Su, S.-F., Chuang, C.-C., Liu, K.-H., “Genetic algorithm with ant colony optimization (GA-ACO) for multiple sequence alignment”, *Applied Soft Computing*, 8, 55-78, 2008.
- [6] Gencer, C., Yaşa, Ö., “Ulaştırma Komutanlığı Ring Seferlerinin Eş Zamanlı Dağıtım Toplama Karar Destek Sistemi”, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık fakültesi Dergisi*, 22, 3, 437-449, 2007.
- [7] Alabaş, Ç., Dengiz, B., “Yerel Arama Yöntemlerinde Yöre Yapısı: Araç Rotalama Problemine Bir Uygulama”, *Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği - XXIV Ulusal Kongresi, Bildiri Kitabı*, 2004.
- [8] Yu, B., Yang, Z., Yao, B., “An Improved Ant Colony Optimization for Vehicle Routing Problem”, *European Journal of Operational Research*, 196, 171-176, 2009.
- [9] Montemanni, R., Smith, D.H., Gambardella, L.M., “A Heuristic Manipulation Technique for the Sequential Ordering Problem”, *Computers and Operations Research*, 35, 3931-3944, 2008.
- [10] Brandao, J., “A Tabu Search Algorithm for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem”, *Computers & Operations Research*, 38, 140-151, 2011.
- [11] Mazzeo, S., Loiseau, I., “An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18, 181-186, 2004.
- [12] Toth, P., Vigo, D., “The Vehicle Routing Problem”, *Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia*, 2002.
- [13] Gajpal, Y., Abad, P.L., “Multi-Ant Colony System (MACS) for a Vehicle Routing Problem with Backhauls”, *European Journal of Operational Research*, 196, 102-117, 2009(a).
- [14] Laporte, G., Palekar, U., “Some applications of the clustered travelling salesman problem”, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 972-976, 2002.
- [15] Kallehauge, B., “Formulations and Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Computers and Operations Research*, 35, 2307-2330, 2008.
- [16] Rousseau, L.-M., Gendreau, M., Feillet, D., “Interior Point Stabilization for Column Generation”, *Operations Research Letters*, 35, 660-668, 2007.
- [17] Jin, M., Liu, K., Ekşioğlu, B., “A Column Generation Approach for the Split Delivery Vehicle Routing Problem”, *Operations Research Letters*, 36, 265-270, 2008.
- [18] Eryavuz, M., Gencer, C., “Araç Rotalama Problemine Ait Bir Uygulama”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi*, 6, 1, 139-155, 2001.
- [19] Gambardella, L.M., *Vehicle Routing Problems (VRPs), Metaheuristics Network, Technische Universiteit Eindhoven, Kısa ders notları*, 2000.
- [20] Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W.P., Vigo, D., “Vehicle Routing”, C. Barnhart and G. Laporte (Eds.), *Handbook in OR and MS*, doi: 10.1016/S0927-0507(06)14006-2, 14, 367-428, 2007.

- [21] Cura, T., *Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları*, Papatya Yayıncılık Eğitim, 1. Basım, İstanbul, 2008.
- [22] Gen, M., Cheng, R., “Genetic Algorithms and Engineering Optimization”, A Wiley-Interscience Publication, John-Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [23] Toğan, V., Daloğlu, A., “Genetik Algoritma ile Üç Boyutlu Kafes Sistemlerin Şekil ve Boyut Optimizasyonu”, *İMO Teknik Dergi*, 251, 3809-3825, 2006.
- [24] Wang, C.-H., Lu, J.-Z., “A Hybrid Genetic Algorithm that Optimizes Capacitated Vehicle Routing Problems”, *Expert Systems with Application*, 36, 2921–2936, 2009.
- [25] Jeon, G., Leep, H.R., Shim, J.Y., “A Vehicle Routing Problem Solved by Using a Hybrid Genetic Algorithm”, *Computers and Industrial Engineering*, 53, 680-692, 2007.
- [26] Bae, S.-T., Hwang, H.S., Cho, G.-S., Goan, M.-J., “Integrated GA-VRP Solver for Multi-Depot System”, *Computers and Industrial Engineering*, 53, 233-240, 2007.
- [27] Alba, E., Dorronsoro, B., “Computing Nine New Best-So-Far Solutions for Capacitated VRP with a Cellular Genetic Algorithm”, *Information Processing Letters*, 98, 225-230, 2006.
- [28] Cheng, C.-B., Wang, K.-P., “Solving a Vehicle Routing Problem with Time Windows by a Decomposition Technique and a Genetic Algorithm”, *Expert Systems with Applications*, 36, 7758–7763, 2009.
- [29] Dorigo, M., Di Caro, G., Gambardella, L.M., “Ant Algorithms for Discrete Optimization”, *Artificial Life*, 5, 2, 137-172, 1999.
- [30] Donati, A.V., Montemanni, R., Casagrande, N., Rizzoli, A.E., Gambardella, L.M., “Time Dependent Vehicle Routing Problem with a Multi Ant Colony System”, *European Journal of Operational Research*, 185, 1174-1191, 2008.
- [31] Chen, C.-H., Ting, C.-J., “A Hybrid Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 2822-2836, 2005.
- [32] Gajpal, Y., Abad, P.L., “An Ant Colony System (ACS) for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup”, *Computers and Operations Research*, 36, 3215-3223, 2009(b).
- [33] Fuellerer, G., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Iori, M., “Ant Colony Optimization for the Two-Dimensional Loading Vehicle Routing Problem”, *Computers and Operations Research*, 36, 655-673, 2009.
- [34] Thangiah, S.R., Salhi, S., “Genetic Clustering: An Adaptive Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem”, *Applied Artificial Intelligence*, 15, 361-383, 2001.
- [35] Salhi, S., Sari, M., “A Multi-Level Composite Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Fleet Mix Problem”, *European Journal of Operational Research*, 103, 95-112, 1997.
- [36] Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G., “A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems”, *Networks*, John Wiley and Sons, Inc., 30, 105-119, 1997.
- [37] Pisinger, D., Ropke, S., “A General Heuristic for Vehicle Routing Problems”, *Computers and Operations Research*, 34, 8, 2403-2435, 2007.