Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 1686-1699, 2021
Journal of the Institute of Science and Technology, 11(3): 1686-1699, 2021

ISSN: 2146-0574, eISSN: 2536-4618

Bilgisayar Mühendisliği / *Computer Engineering* **DOI: 10.21597/jist.816991**

Araştırma Makalesi / *Research Article*

Geliş tarihi / Received: 22.10.2020 **Kabul tarihi / Accepted: 12.03.2021**

Atıf İçin: Keser Bozkurt S, Toprak A, Ciğer F E, Demiröz M, Sariçiçek İ, 2021. Genetik Algoritma ile Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama: İstanbul Anadolu Yakası için Bir Uygulama. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 1686-1699.

To Cite: Keser Bozkurt S, Toprak A, Ciğer F, Demiröz M, Sariçiçek İ, 2021. Simultaneous Pick-Up and Delivery Vehicle Routing Using Genetic Algorithm: An Application for the Anatolian Side of Istanbul. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(3): 1686-1699.

Genetik Algoritma ile Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama: İstanbul Anadolu Yakası için Bir Uygulama

Sinem BOZKURT KESER[1,*], Açelya TOPRAK[1], Faruk Emre CİĞER[1], Mehmet DEMİRÖZ[1], İnci SARIÇİÇEK[2]

ÖZET: Araç rotalama problemi, lojistik alanındaki en önemli problemlerden biridir. Eş zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi, Araç Rotalama Problemi'nin bir türüdür. Bu problem türünde, müşteri veya iş merkezlerinin toplama ve dağıtım talepleri eşzamanlı olarak karşılanmaktadır. Çözümü zor problemler arasında yer alan Eş zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi'nde dikkate alınması gereken bir diğer unsur da araçların kapasitesidir. Bu probleme yönelik olarak son yıllarda yapılan çalışmalarda metasezgisel yöntemlerin sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, İstanbul'un Anadolu yakasında yer alan Ataşehir ilçesinde ana deposu bulunan bir perakende işletmesinin 12 farklı marketinin dağıtım ve toplama taleplerini eş zamanlı karşılayan araç rotalama problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için ceza-tabanlı Genetik Algoritma önerilmiştir. Bu doğrultuda, oluşturulan örnek problem setleri üzerinde kat edilen toplam mesafe en küçüklenecek şekilde en az sayıda araç ile müşterilerin tüm dağıtım ve toplama taleplerini karşılayan verimli rotalar hesaplanmaktadır. Önerilen ceza-tabanlı Genetik Algoritma ile elde edilen sonuçlar bir diğer metasezgisel algoritma olan Tavlama Benzetimi ile karşılaştırılarak algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde ceza-tabanlı Genetik Algoritma ile hem maliyet hem de işlem süresi açısından daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi, genetik algoritma, tavlama benzetimi

Simultaneous Pick-Up and Delivery Vehicle Routing Using Genetic Algorithm: An Application for the Anatolian Side of Istanbul

ABSTRACT: Vehicle routing problem is one of the most important problems in logistics. Simultaneous Pick-up and Delivery Vehicle Routing Problem is a type of Vehicle Routing Problem. In this type of problem, pick-up and delivery requests of customers or business centers are met simultaneously. Simultaneous Pick-up and Delivery Vehicle Routing Problem is one of the difficult problems to solve. Another factor to consider is the capacity of the vehicles. In recent years, it has been observed that metaheuristics methods are used for the solution of this problem. In this study, the vehicle routing problem, which meets the pick-up and delivery demands of 12 different markets of a retail company with a main warehouse in Ataşehir district on the Anatolian side of Istanbul, is discussed. A penalty-based Genetic Algorithm is proposed for the solution of the problem. Accordingly, efficient routes that meet all pick-up and delivery demands of the customers are generated with the least number of vehicles so that the total distance traveled on the sample problem sets is minimized. The performance of the algorithm is evaluated by comparing the results of the proposed penalty-based Genetic Algorithm with another metaheuristics algorithm, Simulated Annealing. When the comparison results are analyzed, it is seen that better results are obtained in terms of both cost and computation time with the penalty-based Genetic Algorithm.

Keywords: Simultaneous pick-up and delivery vehicle routing, genetic algorithm, simulated annealing.

[1] Sinem BOZKURT KESER (**Orcid ID:** 0000-0002-8013-6922), Açelya TOPRAK (**Orcid ID:** 0000-0001-7636-4095), Faruk Emre ÇİĞER (**Orcid ID:** 0000-0002-9290-1230), Mehmet DEMİRÖZ (**Orcid ID:** 0000-0001-5529-8738), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye
[2] İnci SARIÇİÇEK (**Orcid ID:** 0000-0002-3528-7342), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Sinem BOZKURT KESER, e-mail: sbozkurt@ogu.edu.tr

GİRİŞ

Araç Rotalama Problemi (ARP, Vehicle Routing Problem (VRP)), depodan veya depolardan belirli müşteri veya iş merkezlerine ait talepleri karşılayan araç rotalarının belirlenmesi olarak tanımlanır. Taleplerin karşılanması sırasında, ortaya çıkan maliyetleri en aza indirgeyecek şekilde, kullanılan araçların izleyeceği rotanın belirlenmesi önemli karar problemlerinden biridir (Chen ve Wu, 2006). ARP üzerine yapılan çalışmalar, ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından ele alınmıştır (Dantzig ve Ramser, 1959). Literatürde, birçok ARP çeşidi söz konusudur. Ekşioğlu ve ark. (2009) çalışma tipi, senaryo karakteristiği, problemin fiziksel karakteristiği, bilgi ve veri karakteristiğine göre bir sınıflandırma yapmıştır. Berbeglia ve ark. (2007) ise topla-dağıt araç rotalama problemleri için bir sınıflandırma içermektedir.

Depolardan müşterilere veya iş merkezlerine talep edilen ürünlerin dağıtılması; bu müşteri veya iş merkezlerinden ürünlerin toplanması Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_ARP) olarak tanımlanmaktadır (Göksal ve ark., 2013). TD_ARP ile ilgili daha ayrıntılı bilgi elde edebilmek için Koç ve Laporte (2018)'nin oluşturduğu literatür araştırması incelenebilir. TD_ARP'de kendi içerisinde dağıtım ve toplama işlemlerinin sırasına göre üç farklı sınıfa (önce dağıt sonra topla, karma topla dağıt ve eş zamanlı topla dağıt) ayrılmakta olup bu çalışmada Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (EZTD_ARP) ele alınacaktır. Bu problem türünde, depo veya depolardan dağıtım talebi için ziyaret edilen müşteri veya iş merkezlerinin toplama talebi de eş zamanlı olarak aynı araçla karşılanacak şekilde depo veya depolara geri dönülür. Dağıtımı yapılacak olan ürün(ler) bırakıldıktan sonra toplanacak ürün(ler) alınır. Her bir müşteri veya iş merkezi yalnızca bir kez ziyaret edilir (Zachariadis ve ark., 2009). Özellikle, ürünlerin dağıtım noktasından müşteriye ve müşteriden dağıtım noktasına taşınması gereken gıda (içecek endüstrisinde boş şişelerin dağıtımı yapıldıktan sonra geri dönüş amacıyla toplanması), otomotiv, elektronik, bilişim ve endüstri sektörü (ürünlerin dağıtımı ve parçaların geri dönüşüm için fabrikalara geri gönderilmesi) gibi geri dönüşüm uygulamalarında sıklıkla kullanılır.

EZTD_ARP, NP-zor bir problemdir. Bu nedenle, büyük boyutlu gerçek hayat problemlerinde EZTD_ARP'nin çözümünde metasezgisel metotlar önerilmektedir. Genetik Algoritma, Tavlama Benzetimi, Yasaklı Arama ve Karınca Kolonisi gibi algoritmalar, EZTD_ARP'nin çözümünde sıklıkla kullanılan metasezgisel yöntemlerdendir (Awad ve Elshaer, 2019).

Bu çalışmada, bir depo üzerinden belirli sayıda müşteri veya iş merkezine hizmet sağlayacak EZTD_ARP probleminin uygulaması olarak İstanbul'un Anadolu yakasında yer alan bir perakende işletmesi dikkate alınmaktadır. Ataşehir ilçesinde ana deposu bulunan bu perakende işletmesinin 12 farklı marketinin dağıtım ve toplama taleplerini eş zamanlı karşılayan araç rotalama sistemine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu araç rotalama sistemine ait dikkate alınan kısıtlar şu şekildedir.

- Tek bir merkezi depodan hareket edilecek ve yine aynı depoya geri dönülecektir.
- Tüm dağıtım ve toplama talepleri araçların hareketine başlamasından önce belirlenmiştir.
- Homojen ve eşit kapasiteli araçlar taşıma sırasında kullanılmaktadır.
- Planlama uzayında her markete bir kez uğranılacaktır.
- Her araç için hesaplanan rota depodan başlayıp tekrar depoda sonlanacaktır.
- Aracın izleyeceği rota üzerindeki dağıtım ve toplama talepleri araç kapasitesini aşmayacaktır.
- Bir marketten toplanan bir ürünün başka bir markete dağıtımı mümkün değildir.

Bu çalışmada, bu sistem için ceza-tabanlı Genetik Algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma ile oluşturulan örnek problem setleri üzerinde kat edilen toplam mesafe en küçüklenecek şekilde en az sayıda araç ile marketlerin tüm dağıtım ve toplama taleplerini karşılayan verimli rotalar hesaplanmıştır. Önerilen algoritmanın performansını değerlendirebilmek amacıyla küçük ve büyük ölçekli örnek test

problemleri oluşturulmuştur. Bu test problemleri üzerinde önerilen algoritma ile bir başka metasezgisel algoritma olan Tavlama Benzetimi (TB) algoritmasının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde oluşturulmuştur. İkinci bölümde EZTD_ARP ile ilgili bilimsel yazın taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmaya özgü EZTD_ARP tanımı, Genetik Algoritma (GA), TB ve önerilen ceza-tabanlı GA verilmiştir. Dördüncü bölümde, EZTD_ARP için önerilen ceza-tabanlı GA ve TB algoritmalarının performansları test problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalar anlatılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kaynak Araştırması

Halse (1992), EZTD_ARP çözümü için Bender ayrıştırması temelli alt problemlerin sütun türetme ile çözüldüğü bir küme-bölme modeli önermiştir. Dethlof (2001) literatürdeki test problemleri için uyguladığı sezgisel bir algoritmayı gerçek hayat problemleri için de ele almıştır. Nagy ve Salhi (2003) TD_ARP için geliştirdikleri sezgisel algoritmayı tek ya da çok depolu durumlar için değerlendirip Min (1989)'in algoritması ile karşılaştırmış ve bu algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. Crispim ve Brandao (2005) yaptıkları çalışmalarda değişken komşu iniş ve reaktif yasaklı arama algoritmalarını geliştirmiştir. Amico ve ark. (2006) EZTD_ARP'nin çözümü için dinamik programlama ve konum uzayı gevşetme yöntemini önermiştir. Dal-sınır yaklaşımını temel alan bu yöntem, en fazla 40 müşterili problem kümeleri için en uygun çözümü vermektedir. Chen (2006) ekle-tabanlı melez sezgisel algoritma önermiştir. Montane ve Galvao (2006) EZTD_ARP çözümü için yasaklı arama algoritmasını önermiştir. Ropke ve Pisinger (2006) EZTD_ARP'ye zaman penceresini de dikkate aldıkları sezgisel bir algoritma olan geniş komşuluk arama algoritmasını önermiştir. Önerilen algoritmanın, literatürdeki 338 test probleminin 227'sinde daha iyi sonuçları elde ettiği görülmüştür. Bianchessi ve Righii (2007) yerel ve yasaklı arama algoritmalarını, Ai ve Kachitvichyanukul (2009) ise kuş sürüsü davranış algoritmasını literatürdeki test problemleri üzerinde değerlendirmiştir. Gajpal ve Abad (2009) EZTD_ARP üzerinde karınca kolonisi algoritmasını kullanmıştır. Zachariadis ve ark. (2010) Yenilikçi Bellek Programlama mekanizmasına dayalı bir algoritma geliştirmiştir. 50 ile 400 müşteri arasında değişen test problemleri için algoritma performansını değerlendirilmiş ve yüksek kaliteli çözümlerin üretildiği tespit edilmiştir. Catay (2010) tasarruf-tabanlı görünürlük fonksiyonu ve feromon güncelleme prosedürünü kullanan karınca kolonisi algoritmasını önermiştir. Bu algoritmanın, iyi bilinen karşılaştırma problemleri için yapılan testleri neticesinde rekabetçi sonuçlar verdiği ve en iyi bilinen birkaç çözümü elde ettiği tespit edilmiştir. Subramanian ve ark. (2010) yinelemeli yerel arama sezgiseli ile geliştirdikleri paralel algoritmayı entegre etmiştir. Zachariadis ve Kiranoudis (2011) yasaklı arama ve yerel arama algoritmalarının bir araya getirildiği metasezgisel bir algoritma geliştirmiştir. Fan (2011) kat edilen toplam mesafenin en küçüklenmesini ve toplam müşteri veya iş merkezi memnuniyetinin en büyüklenmesini amaçlayan yeni bir model geliştirmiştir. Zaman kısıtının da dikkate alındığı bu model, yasaklı arama algoritması ile değerlendirilmiştir. Subramanian ve ark. (2011) geliştirdikleri dal-kesme algoritmasını 50 ile 200 arasında değişen müşteri sayısına sahip 87 test problemi üzerinde uygulamıştır ve yeni en iyi çözüm değerlerini elde etmiştir. Wang ve Chen (2012) EZTD_ARP için zaman penceresi kısıtını da dikkate alarak karma tamsayılı model geliştirmiş ve GA ile bu modeli değerlendirmiştir. Tasan ve Gen (2012) EZTD_ARP'nin çözümünde GA'ya başvurmuştur. Goksal ve ark. (2013) EZTD_ARP için parçacık sürüsü optimizasyonunu ve değişken komşuluk arama algoritmasını entegre ettikleri melez bir algoritma önermiştir. Geliştirilen bu algoritma ile literatürdeki 104 problem setinde en iyi çözümlere ulaşılmıştır. Liu ve ark. (2013) GA ve yasaklı arama algoritmalarını evde bakım hizmetleri uygulaması için geliştirdikleri yeni bir model üzerinde

değerlendirmiştir. Avci ve Topaloğlu (2015), EZTD_ARP'nin çözümü için uyarlanabilir yerel arama algoritması önermişlerdir. Günther ve ark. (2015) zaman kısıtını da dikkate alarak değişken komşu algoritmasını önermiştir. Kaya (2017) EZTD_ARP için değişken komşuluk arama ve karınca kolonisi algoritmalarını bir araya getiren metasezgisel bir algoritma önermiştir. Literatürdeki test problemleri üzerinde değerlendirilen bu algoritmanın performansının hem çözüm kalitesi hem de CPU kullanımı açısından oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Yazgan ve Büyükyılmaz (2018) EZTD_ARP'nin çözümü için uyarlanabilir geniş komşuluk araması algoritmasını önermiştir. Test problemleri üzerinde önerilen algoritmanın performansı değerlendirilmiştir.

Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi

Halse (1992), EZTD_ARP çözümü için Bender ayrıştırması temelli alt problemlerin kolon üretimi ile çözüldüğü bir küme-bölme modeli önermiştir. Dethlof (2001) literatürdeki test problemleri için uyguladığı sezgisel bir algoritmayı gerçek hayat problemleri için de ele almıştır. Nagy ve Salhi (2003)

Problem Tanımı

EZTD_ARP, müşteri veya iş merkezlerinin toplama ve dağıtım taleplerinin eşzamanlı olarak karşılandığı bir TD_ARP türüdür. Aynı araçla, araçların kapasite kısıtları da dikkate alınarak, yalnızca bir kez ziyaret edilen iş merkezi veya müşterilerin önce dağıtım sonra toplama talebi karşılanmaktadır (Ai ve Kachitvichyanukul, 2009) Otomotiv, gıda, sağlık gibi birçok alanda uygulamaları mevcuttur (Dethlof, 2001).

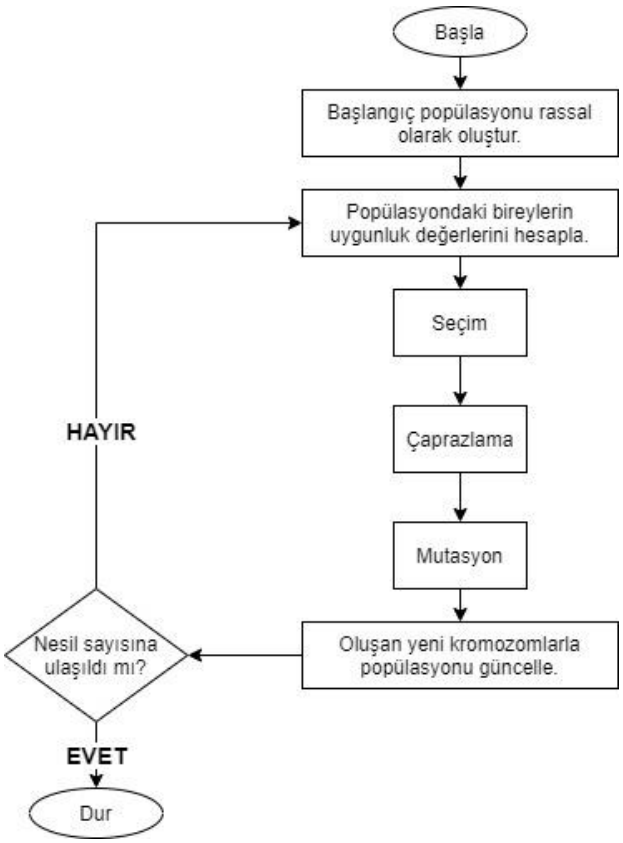
Bu çalışmada, İstanbul'un Anadolu yakasında yer alan Ataşehir ilçesinde ana deposu bulunan bir perakende firmasının 12 farklı marketinin dağıtım ve toplama taleplerini eş zamanlı karşılayan araç rotalama problemi ele alınmıştır. Eşit kapasiteye sahip en az sayıda araç ile toplam kat edilen mesafenin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Problemin çözümünde metasezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Bu amaçla, ceza-tabanlı GA önerilmiş, TB ise önerilen algoritma ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Genetik Algoritma (GA)

GA, ilk olarak John Holland ve ark. tarafından 1975 yılında Michigan Üniversitesi'ndeki çalışmaları sonucu ortaya çıkan sezgisel bir arama algoritmasıdır. Doğadaki evrimsel sürece ait kromozomların yeni dizilimler üretme esasını temel alan iyi olanın hayatta kalma prensibi ile çalışan bir algoritmadır. Geleneksel yöntemler ile çözümü zor olan karmaşık problemlerin çözümünde oldukça hızlı ve iyi sonuçlar verir (Lee ve Kim, 1995). GA, araç rotalama, çizelgeleme, eniyileme gibi bir çok alanda uygulanmaktadır.

GA'da biyolojik evrimi temel alan işlemler uygulanmaktadır. Amaç en iyi uygunluk değerine sahip kromozoma ulaşmaktır (Cheng ve ark., 1995). Tanımlanan probleme ait girdi değerlerinin her biri genleri oluşturmakta genler ise bir araya gelerek kromozomları oluşturmaktadır. Genlerin kromozom içindeki sırası değiştirilerek yeni nesiller oluşturulmakta böylece en iyi kromozoma ulaşılması hedeflenmektedir (Chu ve Beasley, 1996).

GA'ya rasgele üretilmiş bir başlangıç çözümü ile başlanır. Probleme ait rasgele oluşturulmuş olası çözümlerden bir popülasyon oluşturulur. Mevcut popülasyondan nesil seçim işlemi gerçekleştirilir. GA'da, en iyi olanın hayatta kalma prensibi temel alınarak "iyi çocuklar iyi aileden doğar" fikri benimsenir. Bu nedenle, yüksek uygunluk değerine sahip kromozomların aile olarak seçilme olasılıkları daha yüksektir. Aile olarak seçilen kromozomlara bazı genetik operatörler (çaprazlama, mutasyon) uygulanarak popülasyonda çeşitlilik oluşturulur. Belirlenen nesil sayısına ulaşılıncaya kadar bu işlemler tekrarlanır (Chen ve ark., 1996). GA'ya ait işlem adımları Şekil 1 ile verilen akış diyagramı ile açıklanmaktadır.



Şekil 1. Genetik algoritma akış diyagramı.

Tavlama Benzetimi Algoritması (TB)

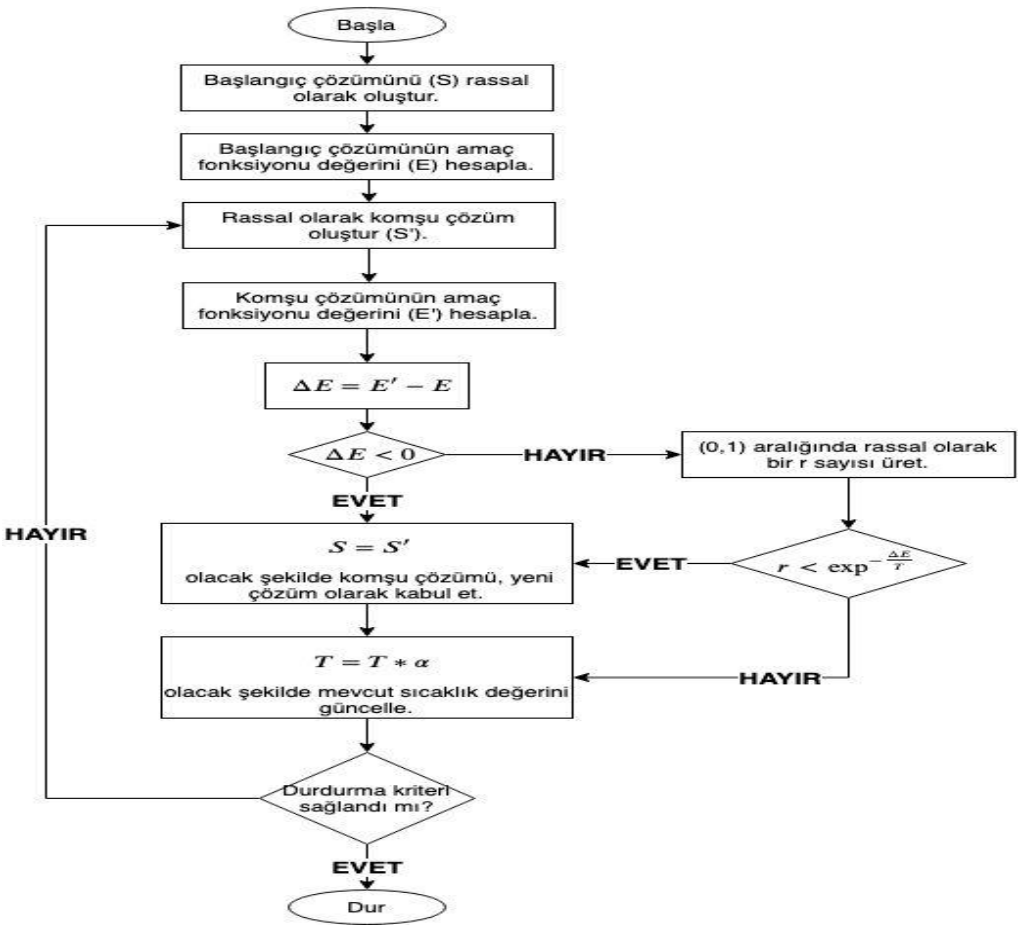
TB stokastik bir arama yöntemidir. Katıların ısıtılması ve sonra yavaş yavaş soğutulması esasına dayanır. İlk olarak Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından 1983 yılında önerilmiştir. TB'nin en önemli özelliği yerel en iyiye takılmayı önleyip bütünsel en iyiye ulaşmaya çalışan bir stratejiye sahip olmasıdır. Bu stratejiye göre sadece amaç fonksiyonunda iyileşme sağlayan çözümler kabul edilmeyip belli bir olasılıkla kötü çözümler de kabul edilmektedir. Problemin çözümünde tavlama benzetimi algoritmasının kullanılabilmesi için başlangıç sıcaklığı (T), soğutma fonksiyonu, algoritma durdurma kriteri parametrelerinin bilinmesi gerekir.

Başlangıç Sıcaklığı: İyi olmayan çözümlerin kabul olasılığını değerlendirmek amacıyla sıcaklık parametresinden yararlanılır. Bu olasılığın 1'e yakın olabilmesi için başlangıç sıcaklık değeri yeterince büyük olmalıdır. Ancak çok yüksek başlangıç sıcaklığı, çok uzun hesaplama süresine veya kötü bir performansa neden olabilir.

Soğutma Fonksiyonu: Mevcut iterasyonun sıcaklığı, bir önceki iterasyondaki sıcaklık değeri kullanılarak hesaplanır. Kaliteli çözümlerin elde edilebilmesi için soğutma işlemi yavaş yavaş gerçekleştirilmelidir. Algoritmanın sonlarına doğru sıcaklık, kötü çözümleri kabul etme olasılığı 0'a yaklaşacak şekilde azaltılmalıdır.

Durdurma Kriteri: Belirlenen iterasyon sayısına, belirli sıcaklık değerine ya da belirli bir amaç fonksiyonu değerine ulaşma durdurma kriteri olarak belirlenebilir.

Çalışmada uygulanan TB algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Tavlama benzetimi algoritması akış diyagramı.

Başlangıç Çözümü Oluşturma: Perakende işletmesine ait tüm marketler üzerinden rassal seçimler yapılarak başlangıç çözümü (S) oluşturulur. Başlangıç çözümünde, tüm marketlere bir kez yer verilmektedir.

Amaç Fonksiyonunun Hesaplanması: Mevcut çözümünün (ilk iterasyonda başlangıç çözümünün) amaç fonksiyonu değeri (E) tüm araçların kat ettiği mesafenin toplamı olup uzaklık matrisinden yararlanarak hesaplanır.

Komşu Çözüm Oluşturma: Bu aşama mevcut çözüm üzerinden rassal olarak değişiklik yapılarak komşu çözüm üretilir ve komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri (E') hesaplanır. Çalışmada rassal olarak seçilen 2 marketin yerleri değiştirilerek komşu çözüm üretilir.

Kabul Aşaması: Eğer komşu çözüm için hesaplanan rotanın maliyeti (E'), mevcut çözüm için hesaplanan rotanın maliyetinden (E) daha iyiyse komşu çözüm (S') yeni mevcut çözüm (S) olarak güncellenecektir. Diğer durumda (daha kötü komşu çözümler için), $\Delta E = E' - E$ için $r \in (0,1)$ olacak şekilde rassal bir sayı üretilir. $r < exp^{\frac{-\Delta E}{T}}$ koşulu sağlanırsa komşu çözüm (S') yeni mevcut çözüm (S) olarak güncellenir. Daha kötü komşu çözümün kabul edilmediği durumlarda ise mevcut çözümün başka bir komşu çözümü rassal olarak üretilerek aynı sorgulama işlemi tekrar edilir.

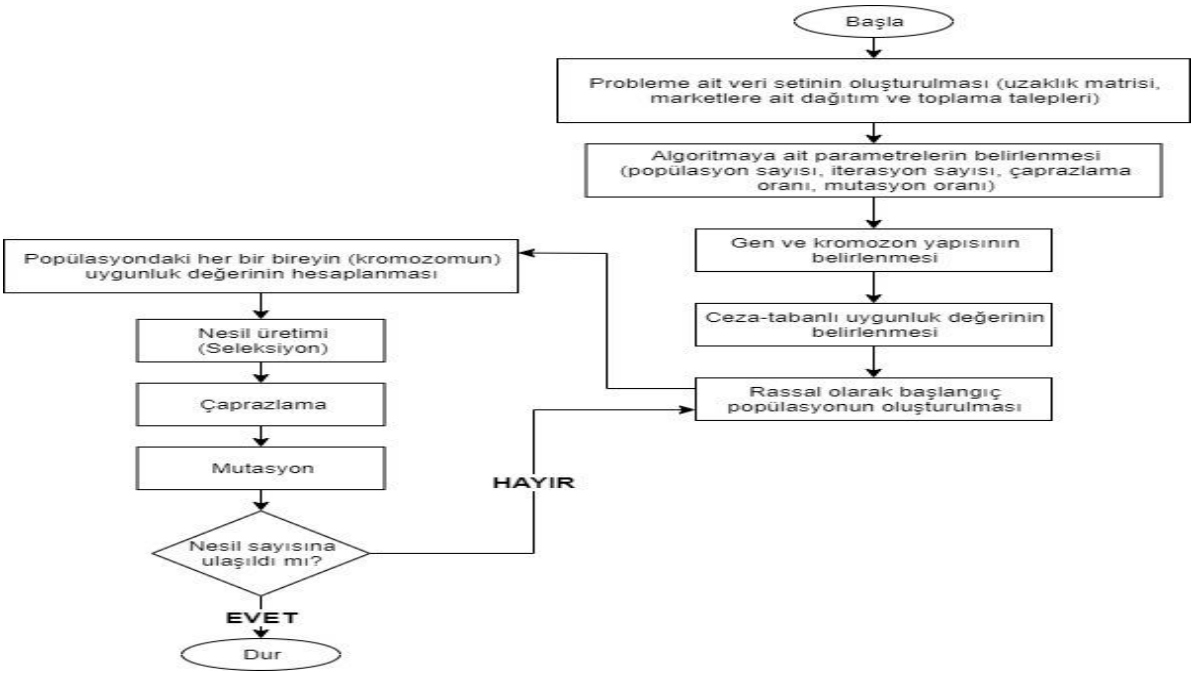
Sıcaklık Güncelleme: α soğuma katsayı için mevcut sıcaklık değeri (T), $T = T * \alpha$ olarak güncellenir.

Durdurma Kriteri: Önceden belirlenen iterasyon sayısına ulaşılınca algoritma sonlandırılır.

Önerilen Ceza-tabanlı Genetik Algoritma

Bu çalışmada, İstanbul Anadolu yakasında bulunan bir perakende işletmesi için EZTD_ARP çözülmeye çalışılmaktadır. Her bir markete aynı araçla hem dağıtım hem de toplama işlemi gerçekleştirilecektir. Klasik kapasite kısıtlı araç rotalama probleminden farklı olarak EZTD_ARP'de

araçların kapasitelerini kontrol altında tutmak oldukça zordur. Araç kapasitelerinin verimli kullanıldığı bir araç rotalama sistemine ihtiyaç duyulur. Araçların verimli kullanılması ile daha az sayıda aracın kullanılması sağlanabilir. Bu amaçla, depodan hareket eden her bir aracın kapasite kısıtı dikkate alınarak en az sayıda araç ile tüm marketlerin dağıtım ve toplama taleplerini karşılayan ve aynı zamanda kat edilen toplam mesafeyi en küçükleyen bir araç rotalama planlama algoritması, ceza-tabanlı GA, önerilmektedir. Önerilen algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Ceza-tabanlı GA akış diyagramı.

Şekil 3 ile verilen önerilen ceza-tabanlı GA 'da;

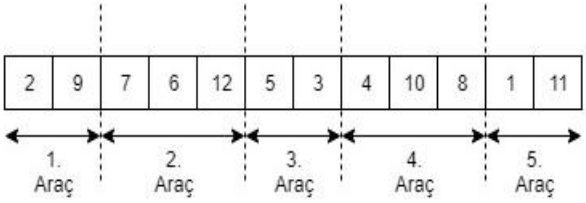
Problem setinin oluşturulması ve algoritmaya ait parametrelerin belirlenmesi: Problemin çözümü için ihtiyaç duyulan verilerin toplanmasıyla algoritmaya başlanılmaktadır. Google Earth tarafından önerilen yollar dikkate alınarak ilçeler arasındaki uzaklık matrisi hesaplanmıştır. Her bir marketin dağıtım ve toplama talepleri ise rassal olarak oluşturulmuştur. Taşıma sırasında 13000 kg dara ve 29000 kg kapasiteye sahip homojen araçlar kullanılmıştır. Algoritmaya ait veriler (popülasyon sayısı, iterasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranı) ise yapılan tekrarlı deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Gen ve kromozom yapısının belirlenmesi: Problem setinde biri ana depo olmak üzere 13 farklı ilçe bulunmaktadır. Her bir ilçe kromozom üzerinde bir geni temsil etmektedir. Kromozom gösterimini kolaylaştırmak üzere her bir ilçeye, ana depo olan Ataşehir "0" olmak üzere, 1'den 12'ye kadar numara verilmiştir. Numaralandırma işlemi alfabetik olarak artan sırada yapılmıştır. Bu işlem Çizelge 1'de özetlenmektedir.

Her bir marketin dağıtım ve toplama talepleri ve araçların kapasiteleri dikkate alınarak başlangıç çözüm rassal olarak oluşturulmuştur. Örnek kromozom yapısı ise Şekil 4'de verilmektedir.

Çizelge 1. Uygulama yapılan ilçeler

İlçe No	İlçe Adı	Dağıtım Miktarı	Toplama Miktarı
0	Ataşehir (Depo)	0	0
1	Beykoz	6164	6027
2	Çekmeköy	6248	6575
3	Kadıköy	6537	3235
4	Kartal	6305	5357
5	Maltepe	8420	2783
6	Pendik	1108	4398
7	Sancaktepe	7000	6323
8	Sultanbeyli	6514	2664
9	Şile	1235	1997
10	Tuzla	1008	1245
11	Ümraniye	4124	1046
12	Üsküdar	2485	1452



Şekil 4. Örnek kromozom yapısı.

Her bir araç için atanan rotadaki talepler aracın kapasitesini aşmamaktadır. Şekil 4'teki kromozom yapısına göre her bir aracın izleyeceği rota aşağıdaki gibidir:

1. $Araç: Depo \rightarrow Çekmeköy \rightarrow Şile \rightarrow Depo$
2. $Araç: Depo \rightarrow Sancaktepe \rightarrow Pendik \rightarrow Üsküdar \rightarrow Depo$
3. $Araç: Depo \rightarrow Maltepe \rightarrow Kadıköy \rightarrow Depo$
4. $Araç: Depo \rightarrow Kartal \rightarrow Tuzla \rightarrow Sultanbeyli \rightarrow Depo$
5. $Araç: Depo \rightarrow Beykoz \rightarrow Ümraniye \rightarrow Depo$

Ceza-tabanlı uygunluk değerinin belirlenmesi: Bu adımda bireylerin (kromozomların) uygunluk değerleri hesaplanarak en iyi uygunluk değerine sahip bireylerin, oluşturulacak yeni popülasyonda yer alması sağlanmaktadır. Çalışmada önerilen ceza-tabanlı uygunluk değerinin hesabında toplam kat edilen mesafenin en küçüklenmesinin yanında tüm marketlerin toplama ve dağıtma taleplerini, araç kapasitelerini de göz önünde bulundurarak, en az sayıda araç ile gerçekleştirilmesi dikkate alınır. Bu doğrultuda, ceza-tabanlı uygunluk değeri toplam kat edilen mesafe ile araç sayısı kadar ceza puanının (P) toplamıdır. Bu ceza puanı (P), aracın günlük kiralama bedeli ve sürücünün günlük çalışma yevmiyesine bağlı büyük bir sabit olarak belirlenmiştir. Her bir kromozom için ceza-tabanlı uygunluk değeri talep noktaları arasındaki mesafelerin toplamından ibarettir. Ayrıca, her bir araç için P kadarlık bir sabit maliyet ceza değerine eklenir. Şekil 4 ile verilen kromozom yapısı için 5 araç kullanıldığından bu değer $5 * P$ kadardır.

Başlangıç popülasyonunu oluşturma: İkili kodlama, permütasyon kodlama, değer kodlama, ağaç kodlama gibi kodlama operatörleri popülasyon oluşturma aşamasında kullanılabilir. Bu çalışmada, değer kodlama tekniği kullanılmıştır. Genler birleşerek bireyleri veya kromozomları oluşturmaktadır ve kromozomlar topluluğu da popülasyonu oluşturmaktadır. İlk popülasyon bireylerinin gen sıralaması rassal olarak oluşturulmuştur.

Oluşan her yeni popülasyonda her bir kromozomun ceza-tabanlı uygunluk değeri hesaplanır ve sıralanır.

Bu sıralama gerçekleştirildikten sonra seçilim işlemine geçilmektedir.

Nesil Üretimi (Seleksiyon): Var olan nesil yerine yeniden nesil oluşturmak için rulet çemberi, sıralı seçim, elit seçim yöntemleri kullanılabilir. Bu çalışmada, en iyi bireyleri korumak amaçlanmış ve bu yönde elit seçim kullanılmıştır. Bu doğrultuda, yeni popülasyondaki rasgele seçilmiş herhangi bir birey ile bir önceki popülasyonun elit (en iyi) bireyi yer değiştirilmektedir. Burada elit birey, en düşük ceza-tabanlı uygunluk değerine sahip bireydir. Böylece, en iyi kromozomların gelecek neslin topluluklarına aktarılması sağlanmaktadır. Yeni popülasyonun sonraki bireyleri ise çaprazlama işlemi sonrasında belirlenmektedir.

Çaprazlama: Çaprazlama işlemi, iki çözümden (kromozom) yeni bir çözüm oluşturulmasıdır. Bu işlem, ikili dizilerin parçalarının birbirleriyle yer değiştirmesi ile gerçekleştirilir. Farklı uygulamalarda farklı kodlama yöntemleri kullanılır. Çaprazlama operatörlerine örnek olarak tek nokta çaprazlama, iki nokta çaprazlama, çok nokta çaprazlama, uniform çaprazlama verilebilir. Bu çalışmada, tek nokta çaprazlama işlemi kullanılmıştır. Çaprazlama işlemine tabi tutulacak olan bireyler bir önceki popülasyondan (seçilen elit bireyler hariç) rassal olarak 4 yarı finalist bireyin seçilmesiyle başlar. Seçilen bu 4 birey kendi aralarında 2'li gruplara ayrılır. Bu gruplar kendi arasında uygunluk değerlerine göre sıralanır. Bu sıralamada en küçük uygunluk değerine sahip iki birey, finalist bireyler olarak seçilir. Daha sonra bu finalist bireyler tek noktalı çaprazlama yöntemiyle çaprazlanır. Bu işlem gerçekleştirilirken birey üzerinde bir nokta belirlenir. Belirlenen bu noktadan önce yer alan genler çaprazlanacak diğer bireyden silinir ve geri kalan genler bireye eklenir. Çaprazlama işlemi tamamlandıktan sonra oluşan bireyler yeni popülasyona eklenmeye hazır hale gelmektedir. Popülasyondaki birey sayısı tamamlanana kadar bu işleme devam edilmektedir. Çaprazlama işlemi gerçekleştirildikten sonra rassal olarak belirlenen birey veya bireyler mutasyon işlemine uğrar.

Mutasyon: Kromozom üzerindeki bazı dizilerin (DNA) yerleriyle oynayarak değişiklikler yapılmasıdır. Özellikle problemin çözüm uzayında mutasyon oldukça önem taşır. Zira dar topluluklarda oluşan bir mutasyonun sonraki nesiller üzerindeki etkisi de yüksek olacaktır. Nesiller arası çeşitliliğin azalması durumunda mutasyon iyi bir etki yaratabilmektedir. Böylece, nesiller arasındaki farklılaşmaya katkıda bulunarak çözüm uzayının farklı bölgelerinin aranmasını sağlamaktır. Mutasyon operatörleri, probleme göre ters çevirme, ekleme, yer değiştirme, karşılıklı değişim olarak tercih edilebilir. Bu çalışmada, ters çevirme mutasyon operatörü kullanılmıştır. Çaprazlama sonrasında kullanıcı tarafından girilen mutasyon oranına bağlı olarak bireyler rassal olarak seçilerek mutasyona uğratılır. Mutasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra yeni popülasyon elde edilir.

Kullanıcının belirlediği iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar yeni popülasyon ile yukarıda tanımlanan işlemler tekrar edilmektedir. Belirlenen iterasyon sayısına ulaşıldığında en düşük ceza-tabanlı uygunluk değerine sahip kromozomun elde edilmesi beklenmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen ceza-tabanlı genetik algoritmanın performansını değerlendirmek için test problemleri (Elbasan, 2015) kullanılarak ceza-tabanlı GA ve TB algoritmaları karşılaştırılmıştır. Bu test problemlerinde dağıtım ve toplama değerleri için aralık belirlerken araçların toplam kapasitesi, müşteri sayısına bölündükten sonra bulunan değerlere bağlı olarak alt ve üst sınırlar belirlenmiştir. Bu sınırlar temel alınarak dağıtım ve toplama değerleri rassal olarak türetilmiştir. Küçük ölçekli problemlerde dağıtım ve toplama talebinde bulunan market sayısı 7 ile 10 arasında, bu marketlerin taleplerini karşılayan araç sayısı ise 2 ile 3 arasında değişmektedir ve 13000 kg dara ve 29000 kg kapasiteye sahip homojen araçlar için rotalar oluşturulmaktadır.

Önerilen ceza-tabanlı GA ve TB algoritmaları, çift çekirdekli, Windows işletim sistemine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. 4 GB RAM'e sahip (Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30GHz 2.40GHz) bu bilgisayarda .NET Framework 4.6.1 ve MS Visual Studio 2017 altındaki MS C # .NET kullanılarak algoritmalar kodlanmıştır. Önerilen ceza-tabanlı GA için parametreler: iterasyon sayısı 50, popülasyon sayısı 500, çaprazlama ve mutasyon oranı 1 olarak belirlenmiştir. TB için ise başlangıç sıcaklığı (T) 500, α değeri 0.9 ve iterasyon sayısı da 10000 olarak belirlenmiştir.

Toplamda 8 adet küçük ölçekli test problemi için önerilen ceza-tabanlı genetik algoritma ve TB algoritmalarının toplam kat edilen mesafe (m) ve hesaplama süresi (s) açısından karşılaştırılması Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 2. Küçük ölçekli test problemleri üzerinde algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması

Problem	Market Sayısı	Araç Sayısı	Önerilen ceza-tabanlı GA		TB		% Sapma
			Mesafe (m)	Süre (s)	Mesafe (m)	Süre (s)	(Mesafe)
7M_2A	7	2	136010	0.28	163010	5.54	**19.85**
7M_3A	7	3	166110	0.32	166110	5.63	0.00
8M_2A	8	2	132610	0.32	158060	5.39	**19.19**
8M_3A	8	3	162310	0.34	170460	5.62	**5.02**
9M_2A	9	2	156850	0.37	167310	5.7	**6.67**
9M_3A	9	3	167610	0.39	178110	5.91	**6.26**
10M_2A	10	2	221550	0.39	230510	5.73	**4.04**
10M_3A	10	3	232310	0.48	232310	5.9	0.00

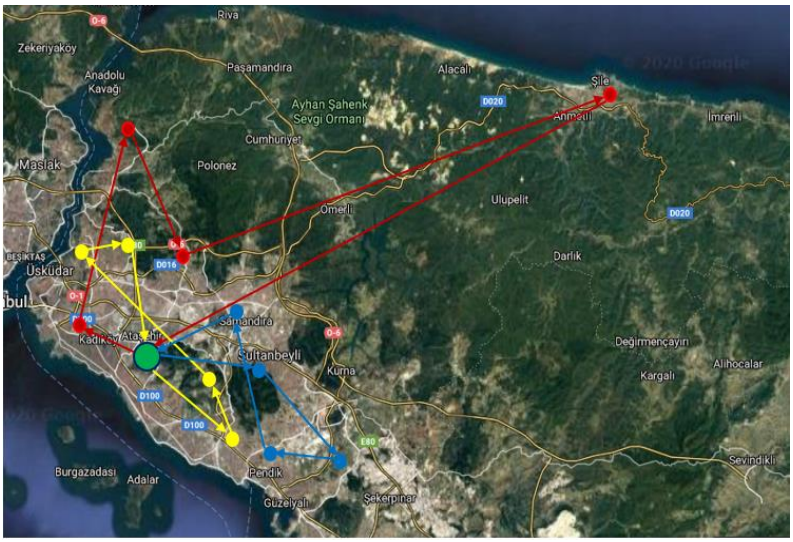
Genetik algoritma, ceza-tabanlı bir yaklaşım ile ardıştırma yaparken tavlama benzetimi algoritmasında ceza-tabanlı yaklaşım işletilmemiştir. Eşit ardıştırma sayısı için kıyaslanan ceza-tabanlı genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması kıyaslandığında önerilen ceza-tabanlı GA ile hem kat edilen toplam mesafe hem de hesaplama süresi açısından TB'ye göreceli olarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, tavlama benzetimi algoritmasında ardıştırma sayısının arttırılması ile daha iyi çözümler elde edilebilir. Büyük ölçekli test problemlerinde (Elbasan, 2015) algoritmaların performanslarının karşılaştırılması 2 ile 6 arasında değişen araç sayısında ve her bir araç sayısı için 3 farklı problem seti olmak üzere toplamda 10 test problemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen ceza-tabanlı GA ve TB algoritmalarının toplam kat edilen mesafe (m) ve hesaplama süresi (s) açısından büyük test problemleri için karşılaştırılması Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 3. Büyük ölçekli test problemleri üzerinde algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması

Problem	Araç Sayısı	Problem Numarası	Önerilen ceza-tabanlı GA		TB		% Sapma
			Mesafe (m)	Süre (s)	Mesafe (m)	Süre (s)	(Mesafe)
2A_2	2	2	249440	0.58	251790	6.18	**0.94**
2A_3	2	3	236790	0.67	258830	6	**9.31**
3A_2	3	2	270280	0.66	281740	6.18	**4.24**
3A_3	3	3	272140	0.76	313440	6.7	**15.18**
4A_2	4	2	295340	0.64	329490	6.31	**11.56**
4A_3	4	3	318690	0.72	328240	6.12	**3.00**
5A_2	5	2	322890	0.69	330400	6.12	**2.33**
5A_3	5	3	312110	0.73	336340	6.16	**7.76**
6A_2	6	2	361110	0.63	361110	6.55	0.00
6A_3	6	3	408010	0.61	408310	6.36	**0.07**

Çizelge 3, perakende işletmesine ait tüm marketlerin dikkate alınarak tanımlandığı problem setleri için oluşturulmuştur. Çizelge 3'deki sonuçları değerlendirdiğimizde, en yüksek 3A_2 kodlu problem seti için önerilen ceza-tabanlı GA ile 11430m'lik bir iyileştirmeye ulaşıldığı görülmektedir. Üstelik bu

değere, TB ile kıyaslandığında çok daha kısa (0.66s) bir sürede erişilmiştir. Çizelge 3'de sonuçları verilen örnek problemden 3A_2 kodlu problem seti için hem önerilen ceza-tabanlı GA hem de TB algoritmaları ile bulunan en iyi rotaların harita üzerinde gösterimi sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 5. Önerilen ceza-tabanlı GA ile hesaplanan en iyi rota.

Şekil 5'de ana depo (Ataşehir) yeşil nokta ile gösterilmiş olup her bir araç için hesaplanan rotalar ise farklı renklerde gösterilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilen rotanın en yüksek maliyetli rota olduğu görülmektedir.



Şekil 6. TB algoritması ile hesaplanan en iyi rota.

Şekil 6'da benzer şekilde ana depo (Ataşehir) yeşil nokta ile araçların izlediği rotalar farklı renkler ile gösterilmiştir. Burada ise sarı renkli rotanın en yüksek maliyetli rota olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, EZTD_ARP'nin gerçek bir uygulama problemi üzerinde çözülmesi ele alınmıştır. Ataşehir' de ana deposu bulunan 12 marketli bir perakende işletmesi için hem dağıtım hem de toplama hizmetlerini karşılayacak şekilde araç rota planlaması gerçekleştirilmiştir. Araçların kapasitesi eşit olup hem dağıtım hem toplama işlemlerinde eş zamanlı kullanılmaktadır. Bu durum, araçların kapasitelerinin kontrolünün zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, araçların en verimli şekilde kullanımının yanında 12 market için gidilen toplam mesafenin en küçüklenmesini sağlayan günlük rota planlarının

oluşturulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, ceza-tabanlı GA önerilmiştir. Farklı problem senaryoları için büyük ve küçük ölçekli test problemleri üretilmiştir. Oluşturulan bu test problemlerinde önerilen algoritma ve TB algoritmasının performansı kat edilen mesafe ve algoritmalarının işlem süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde önerilen algoritmanın, daha kısa işlem sürelerinde TB algoritmasına göre neredeyse her problem tipi için daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemine zaman penceresi kısıtı eklenmesi, birden çok depo üzerinden dağıtım ve toplama işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve heterojen araçların kullanılması problemin dinamikleştirilmesi yönünde gelecekte yapılacak çalışmalar arasında gösterilebilir. Önerilen algoritma tarafında yapılacak gelecek çalışmalar ise kromozomların tekrarlı seçiminin önlenmesi, algoritmada kullanılan operatörlerinin (çaprazlama, mutasyon vb.) dinamik olarak değiştirilebilir olması ve algoritmaya ait işlemlerin işlemci üzerinde paralel olarak gerçekleştirilmesi gösterilebilir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

Ai J, Kachitvichyanukul V, 2009. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. Computers and Operations Research, 36(5): 1693-1702.

Avci M, Topaloglu S, 2015. An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries. Computers and Industrial Engineering, 83: 15–29.

Awad H, Elshaer R, 2019. A Taxonomic Review of Metaheuristic Algorithms for Solving the Vehicle Routing Problem and Its Variants. Computers and Industrial Engineering, 106242.

Berbeglia G, Cordeau JF, Gribkovskaia I, Laporte G, 2007. Static pickup and delivery problems: A Classification scheme and survey. Top, 15(1): 1-31.

Bianchessi N, Righini G, 2007. Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. Computers and Operations Research, 34 (2): 578-594.

Catay B, 2010. A new saving-based ant algorithm for the vehicle routing problem. Expert Systems with Applications, 37 (10): 6809-6817.

Chen CL, Neppalli RV, Aljaber N, 1996. Genetic Algorithm Applied to the Continuous Flow Shop Problem. Computers and Industrial Engineering, 30(4), 919-929.

Chen J, 2006. Approaches for the vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pick-ups. Journal of the Chinese Institude of Industrial Engineers, 23(2): 141-150.

Chen, JF, Wu TH, 2006. Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. Journal of the Operational Research Society, 57(5): 579–587.

Cheng R, Gent M, Tosawa T, 1995. Genetic Algorithms for Designing Loop Layout Manufacturing Systems. Computers and Industrial Engineering, 31(3-4): 587-591.

Chu PC, Beasley JE, 1996. A Genetic Algorithm for the Generalised Assigment Problem. Computers and Operations Research, 24(1): 17-23.

Crispim J, Brandao J, 2005. Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls. Journal of the Operational Research Society, 56(11): 1296-1302.

Dantzig GB, Ramser JH, 1959. The truck dispatching problem. Management Science, 6(1): 80–91.

Dell'Amico M, Righini G, Salani M, 2006. A branch and price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection. Transportation science, 40(2): 235-247.

Dethloff J, 2001. Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. OR Spektrum, 23(1): 79-96.

Elbasan S, 2015. Karbon Ayak İzini Dikkate Alan Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).

Ekşioğlu B, Vural AV, Reisman A, 2009. The vehicle routing problem: A taxonomic review. Computers and& Industrial Engineering, 57(4): 1472-1483.

Fan J, 2011. The vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery based on customer satisfaction. Advanced in Control Engineering and Information Science, 15: 5284-5289.

Gajpal Y, Abad P, 2009. An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup. Computers and Operations Research, 36(12): 3215-3223.

Goksal FP, Karaoglan İ, Altıparmak F, 2013. A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. Computer Industrial Engineering, 65(1): 39-53.

Günther HO, Kulak O, Kalayci CB, Polat O, 2015. A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. European Journal of Operational Research, 242(2): 369-382.

Halse K, 1992. Modeling and solving complex vehicle routing problems, Technical University of Denmark, Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Doktora Tezi (Basılmış).

Holland J, 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, Society for Industrial and Applied Mathematics, No:3, Philadelphia-United States.

Kaya C, 2017. Eş Zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi için karınca koloni sistemi ile güçlendirilmiş değişken komşuluk arama algoritması, Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).

Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP, 1983. Optimization by simulated annealing. Science, 220(4598): 671-680.

Koç Ç Laporte G, 2018. Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. Computers and Operations Research, 91: 79-91.

Lee CY, Kim SJ, 1995. Parallel Genetic Algorithm for the Earliness Tardiness Job Scheduling Problem With General Penalty Weights. Computers and Industrial Engineering, 28(2): 231-243.

Liu R, Xie X, Augusto V, Rodriguez C, 2013. Heuristic approaches for a special simultaneous pick-up and delivery problem with time windows in home healthcare industry. European Journal of Operational Research, 230(3): 475-486.

Min H, 1989. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and Pick up points, Transportation Research, 23(5): 377-386.

Montane FAT, Galvao RD, 2006. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. Computer Operations Research, 33(3): 595-619.

Nagy G, Salhi S, 2003. Heuristic Algorithms for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries. European Journal of Operational Research, 162(1): 126-141.

Ropke S, Pisinger D, 2006. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. European Journal of Operational Research, 171(3): 750-775.

Subramanian A, Drummond LM, Bentes C, Ochi LS, Farias R, 2010. A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. Computers and Operations Research, 37(11): 1899-1911.

Subramanian A, Uchoa E, Pessoa A A, Ochi L S, 2011. Branch and cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. Operations Research Letters, 39(5): 338-341.

Tasan S, Gen M, 2012. A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. Computers and Industrial Engineering, 62(3): 755-761.

Wang HF, Chen YY, 2012. A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pick-up problems with time windows. Computer Industrial Engineering, 62(1): 84-95.

Yazgan HR, Büyükyilmaz RG, 2017. Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemine sezgisel bir çözüm yaklaşımı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2): 436-449.

Zachariadis E, Tarantilis CD, Kiranoudis CT, 2010. An adaptive memory methodology for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. European Journal of Operational Research, 202(2): 401-41.

Zachariadis EE, Kiranoudis CT, 2011. A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. Expert Systems with Applications, 38(3): 2717-2726.

Zachariadis EE, Tarantilis CD, Kiranoudis CT, 2009. A Hybrid Metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service. Expert System with Applications, 36(2): 1070-1081.