




Akıllı çöp konteynerleri ile değişken ağ yapısına sahip çöp rotalama optimizasyonu

Waste routing optimization with variable network structure with smart waste containers

Hacer Kübra İNKAYA ZENGİN¹ , Soner HALDENBİLEN¹ , Olcay POLAT^{2*} 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
kubrainkaya@outlook.com.tr, shaldenbilen@pau.edu.tr

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
opolat@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.06.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 07.11.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.10.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.71429
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

İnsanlık var olduğu sürece atık üretmeye devam edecektir. Yaşanılabilir bir toplum için bu atıkların düzenli aralıklarla toplanması ve bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu atıkların toplanması ve bertaraf edilmesi birçok prosesi kapsamakta ve oldukça maliyetli olabilmektedir. Bu çalışmada katı atığın oluşumundan bertaraf tesisine kadar olan yolculuğunun minimum süre ve maliyetle optimize edilmesi amaçlanmış ve optimizasyon tekniği olarak kapasite kısıtlı Araç Rotalama Probleminin (ARP) çözümü modifiye edilerek kullanılmıştır. Kapasite kısıtlı ARP içerisine dinamik bir bakış açısı eklenerek konteyner doluluklarının belirlenen seviyesine göre toplanması ya da toplanmaması karar mekanizmasına göre rotalar oluşturulmuştur. Nesnelerin interneti yönteminden yararlanılmış ve konteynerlere doluluk sensörleri eklenmiştir. Algoritmanın çözümünde meta sezgisel yöntemlerden genetik algoritma kullanılmış ve Python programı üzerinden modellenmiştir. Algoritmanın sonuçları önce deneme ağında test edildikten sonra mevcut bir konum seçilmiştir. Seçilen bölge Denizli ilinde Gerzele Mahallesi'dir ve hesaplamalarda mahalleye ait TÜİK verileri kullanılmıştır. Mahalleye ait koordinat verileri ve konteynerlerin konumları haritaya işlenmiş buradan da Visum programına eklenerek ulaşım verisi oluşturulmuştur. Konteynerlerdeki sensörler sayesinde doluluklarına göre toplama işlemi yapılmış ve birkaç senaryo ile denemeler yapılmıştır. Atık lojistiği için maliyet, kat edilen mesafe ve toplama sürelerinde %20-40 oranında azalmaların elde edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Araç rotalama problemi (ARP), Genetik algoritma (GA), Dinamik araç rotalama problemi (DARP), Katı atık optimizasyonu, Çöp toplama problemi, Değişken ağ yapısı.

Abstract

As long as humanity exists, it will continue to produce waste. For a livable society, these wastes need to be collected and disposed of at regular intervals. The collection and disposal of these wastes involve many processes and can be quite costly. This study aims to optimize the journey of solid waste from generation to a disposal facility with minimum time and cost, and the solution of the Capacity-constrained Vehicle Routing Problem (CVRP) is used as an optimization technique in this study. A dynamic perspective was added to the capacitated CVRP by incorporating a decision mechanism that determines whether containers should be collected or not based on their predetermined fill levels. The Internet of Things methodology was utilized, and fill sensors were added to the containers. Genetic algorithms, one of the metaheuristic methods, were used in the algorithm's solution, which was implemented through a Python program. After testing the algorithm on a trial network, a specific location was selected. The chosen region is Gerzele Neighborhood in Denizli Province, and the TURKSTAT data pertaining to the neighborhood were used in the calculations. The coordinate data for the neighborhood and the locations of the containers were mapped, and transportation data was generated by integrating them into the Visum program. The collection process was carried out based on the fill levels of the containers using the sensors, and several scenarios were tested. It was determined that cost, distance traveled, and collection times for waste logistics could be reduced by 20-40% based on the obtained results.

Keywords: Vehicle routing problem (VRP), Genetic algorithm (GA), Dynamic vehicle routing problem (DVRP), Solid waste optimization, Garbage collection problem, Variable network structure.

1 Giriş

Atıklar günlük hayatımızın değişmez ve eksilmez bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Bölgeden bölgede değişik gösterse de Türkiye için günlük katı atık üretimini 2018 yılı verilerine göre kişi başı 1.16 kg olduğu belirlenmiştir [1].

Atık istatistikleri incelendiğinde 1399 belediyeden 1395'inin katı atık hizmeti verdiği ve toplanan katı atıkların %67.2'sinin düzenli depo sahalarına taşındığı ve sadece %12.3'ünün geri dönüşüm tesisine gönderildiği belirlenmiştir [2]. Genellikle atığın toplanması işlemi bölgeden sorumlu belediyeler tarafından yürütülmektedir.

Katı atık süreçlerinde en yüksek maliyet atığın taşınması aşamasıdır. Atığın üretildiği yerden depolama sahasına taşınması işleminde kat edilen mesafenin azaltılabilmesi maliyetleri büyük oranda etkileyecektir.

Bu çalışmada katı atık lojistiği olarak tanımlanan atığın toplanıp depolama alanına götürülmesi sürecindeki araç rotalama probleminin farklı yaklaşımlarla çözümlenmesi ve atık lojistiğinde bu yaklaşımların maliyeti düşürücü etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada çöp konteynerlerinin akıllı oldukları varsayımı üzerine hareket edilmiştir. Her bir konteynerinin içerisindeki çöp miktarının anlık olarak değişebileceği ve değişimin online bir sistem üzerinden görülebileceği varsayılmıştır.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Konteynerlerdeki çöp miktarlarının bilinmesi durumunda belirli dolma miktarına ulaşmayan konteynerlere uğranmayarak zamandan ve mesafeden tasarruf edilmesi planlanmaktadır. Burada problem dinamik rotalamaya evrilmektedir. Anlık olarak doluluk oranlarının bilinmesi ile rotalama işlemi yapılacaktır.

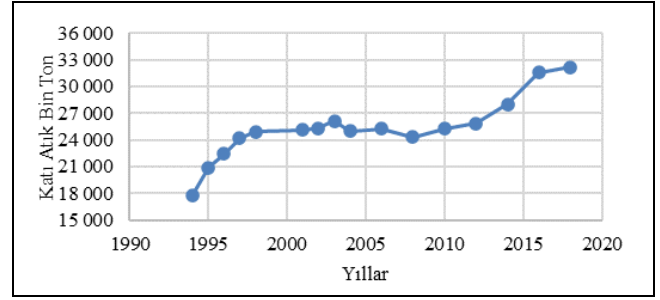
Gün içerisinde konteynerlerin sabah dolulukları ile akşam dolulukları bölgelerin alışkanlıklarına göre değişim göstermektedir. Çöp aracı rotasına başladığı ve konteynerlere uğradığı sırada çöp konteynerinin dolmadığı fakat uğradığı için içerisindeki çöpü alıp bir daha o noktaya uğramadığı bilinmektedir. Ayrıca çöp elleçleme işlemi oldukça zaman gerektiren bir prosedir. Çöp elleçleme işleminde çöp kamyonu konteyner yaklaşır, yanında durur, elemanlar konteyner içerisindeki çöpleri araca aktarır ve ardından diğer konteyner doğru yol alınmaktadır. Bu işlem sırasında hem trafik olumsuz yönde etkilenmekte hem de çok fazla zaman harcanarak çevreye ses ve koku rahatsızlığı verilmektedir. Çalışmada konteynerin doluluğu belirli bir seviyeye gelmeden o noktaya uğranmaması ve bu sayede bir sonraki rotaya başlandığında tekrar dolulukların kontrol edilerek rotanın saptanması ile hem zamandan hem de ekonomik olarak kazanç sağlanması hedeflenmiştir.

Araç rotalama problemi ilk olarak 1959 yılında "Truck Dispatcing Problem" isimli çalışma ile Dantzig ve Ramsey tarafından geliştirilmiştir [10]. Ardından 1964 yılında Clarke ve Wright tarafından geliştirilen tasarruf algoritması ile ARP çözümüne başka bir bakış açısı kazandırılmıştır [11]. Bu çalışmada birçok araç rotalama problem çözümleri incelenmiş ve çalışma konusu olan katı atık optimizasyonu problemi için en uygun yöntem aranmıştır. ARP bilinen 3 çözüm yöntemi bulunmaktadır. Bunlar kesin çözüm yöntemleri, sezgisel çözümleri ve meta sezgisel çözüm yöntemleridir. Uygulama alanı büyüklüğü ve veri sayısının çokluğundan dolayı hızlı çözüme ulaşabilmek için bu çalışmada meta sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma ile çözüme gidilmeye çalışılmıştır. Atık toplayacak araçların kapasitelerinin sınırlı olması bizi kapasite kısıtlı araç rotalama problemi çözümlerine yönlendirmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan kapasite kısıtlı ARP yönteminin yanı sıra çöp konteynerlerinin doluluklarına göre rota değişiklikleri yapılabilmesinden ötürü çalışma dinamik bir çözüm yöntemine evrilmiştir. Bu çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayıran kapasite kısıtlı olan probleme dinamik perpektiften çözüm üretilmesinin yanında IOT (nesnelerin interneti) sistemleri ile entegre olması söylenebilir.

ARP çözüm yöntemleri 2.4 Araç Rotalama Problemi bölümünde aktarılmıştır.

2 Katı atık lojistiği ve araç rotalama problemi

Ülkemiz özelinde bakıldığında hızlı nüfus artışı, düzensiz kentleşme, sanayileşmedeki artış, tüketim alışkanlıklarının değişimi ile katı atık üretim oranının da bu değişkenlere bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. Belediyeler tarafından toplanan katı atık miktarları incelendiğinde 2014 yılında 28,011,000 ton, 2016 yılında 31,584,000 ton ve 2018 yılında 32,209,000 ton atık miktarının belediyelerce toplandığı belirlenmiştir [2]. TÜİK verileri incelendiğinde her yıl belediyeler tarafından toplanan katı atık miktarının 1994-2018 yılları arasında artışı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Katı atığın yıllara göre değişimi.

Figure 1. Change in solid waste over the years.

2.1 Katı atık yönetimi

Atığın bütün türlerinin yerinde azaltılması, oluşturulan bölgelerden toplanması, ara depolama işlemi için taşınması, atığın ayrıştırılma, geri kazanım, geri kullanım proseslerinden geçirilmesi, bertaraf tesislerinin işletilmesi ile bakım onarım, kontrol süreçlerinin tamamının yönetimine atık yönetimi denir.

Atık yönetiminin belirlenen ilkeler doğrultusunda sürdürülebilir bir uygulama olarak işletilebilmesi için;

- Yönetim biriminin oluşturulması
- Atığın tanımlanması ve kaynağının belirlenmesi
- Kaynağından ayrıştırılmış şekilde toplanması
- Geçici transfer merkezinin ve atığın burada uygun koşullarla muhafaza edilebileceği ortamın oluşturulması
- Gerekli durumlarda atık ön işlemlerinin (sıkıştırma vb.) yapılması

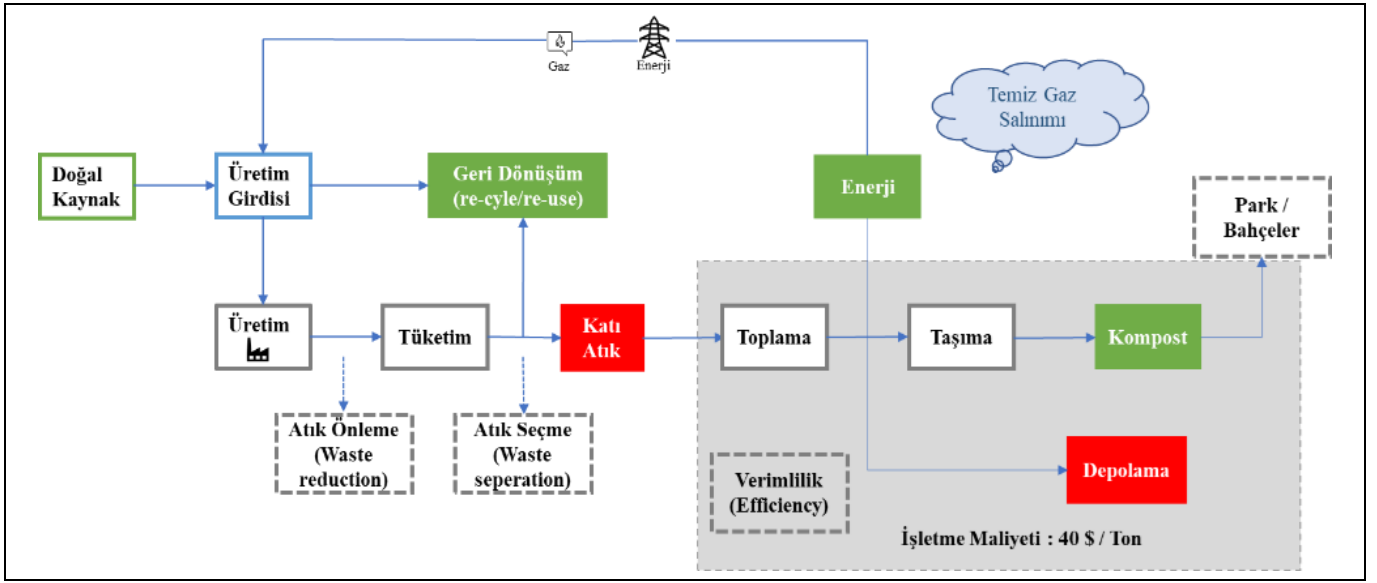
Atığın geri dönüşüm veya bertaraf işlemlerinin tamamlanması gerekmektedir. O'de atığın oluşum, geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri gösterilmiştir.

Ulusal Atık Yönetimi Eylem Planlarına göre 2016 yılı belediye atıklarının düzenli depolama oranının %60, toplanan katı atıktan sadece %5'inin geri kazanıma katılabildiği, ambalaj atığı geri kazanımının %8 olduğu belirtilmiştir.

Gelişmiş ülkelerin, sürdürülebilirlik ve daha yaşanılabilir bir çevre için önemli stratejiler geliştirdikleri görülmektedir. Bu stratejilerden biri de katı atıklardan sağlanan geri dönüşüm çalışmasıdır. Bu konu üzerine birçok ülke uzun vadeli planlar gerçekleştirmiştir. 2017 yılında çevre danışmanlığı yapan bir kurum olan Enomia tarafından yayınlanan bir raporda dünya devletlerinin gerçekleştirmiş olduğu katı atıklarının geri dönüşüm oranları paylaşılmıştır [4]. Bu çalışmada katı atıktan geri dönüşüm yapabilme oranlarına göre bir sıralama oluşturulmuş ve ilk 25 ülke Şekil 3'te verilmiştir. Toplanılan katı atığın %66.1'ini geri dönüştüren Almanya 1. sırayı alırken %34.6 oranı ile A.B.D. 25. sırada yerini almaktadır. Türkiye'deki geri dönüşüm oranının oldukça düşük olması sebebiyle Türkiye bu listeye girememiştir.

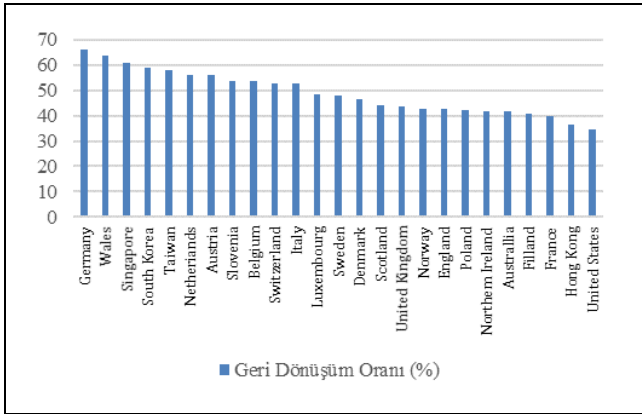
2.2 Katı atık lojistiği

Türkiye'de katı atığın toplanması ve taşınması işlemleri belediyelerce ya da belediyelerin anlaşmış oldukları firmalar tarafından gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde toplam 1.389 Belediye ve bu belediyelerinde 30'unun Büyükşehir Belediyesi olduğu bilinmektedir [5] Türkiye'de 2003 yılında 15 adet olan düzenli atık toplama merkezlerinin 2010 yılında 46'ya, 2015 yılında 81'e 2016 yılında 84'e, 2017 yılında 87'ye ve 2018 yılında 88'e ulaştığı bilinmektedir.



Şekil 2. Kırtı atık oluşum, geri dönüşüm ve bertaraf süreci [3].

Figure 2. Solid waste generation, recycling, and disposal process [3].



Şekil 3. Ülkelerin kırtı atık geri dönüşüm oranları [4].

Figure 3. Solid waste recycling rates of countries [4].

2019 yılı itibariyle 89 tesis ile 1.179 belediyede 64.8 milyon nüfusa hizmet verilmiştir. 2019 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığının yayınladığı verilerine göre düzenli depolama hizmeti verilen nüfusun, toplam belediye nüfusuna oranının %82 olduğu belirlenmiştir [6]. Dünya Bankası'nın yayınladığı "Kentsel Gelişim Serisi"nde kırtı atık yönetiminin yaklaşık maliyetinin ülkelerin gelir seviyelerine göre atık miktarlarının, toplama verimliliğinin, enerji dönüşüm oranlarının değişleri 0 ve 0'de gösterilmiştir.

Gelir düzeyi düşük ülkelerde belediyelerin atık yönetimi için ayırdıkları bütçenin %80-90'ını çöp toplama maliyeti oluşturmaktadır. Gelir düzeyi orta olan ülkelerde bu oran %50 ile %80 arasında değişirken, gelir düzeyi yüksek ülkelerde ise %10 seviyelerindedir [8]. Türkiye gelir seviyesi orta olan ülkeler sınıfındadır ve bu durumda çöp toplama maliyeti bütün kırtı atık yönetim maliyetleri içerisinde en fazla orana sahip olan gider kalemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 1. Ülkelerin gelir düzeylerine göre atık yönetimi miktarları [7].

Table 1. Waste management quantities based on countries' income levels [7].

	Düşük Gelirli Ülkeler	Orta Altı Gelirli Ülkeler	Orta Üstü Gelirli Ülkeler	Yüksek Gelirli Ülkeler
Gelir (GSMH)	<\$876	\$876-3465	\$3466-10725	>\$10725
Atık Üretimi (ton/GSMH/yıl)	0.22	0.29	0.42	0.78
Toplama Verimliliği	43%	68%	85%	98%
Toplama ve Bertaraf Etme Maliyeti (US\$/Ton)				
Toplama	20-30	30-75	40-90	85-250
Düzenli Depolama Sahası	10-30	15-40	25-65	40-100
Vahşi Depolama	2-8	3-10	NA	NA
Kompostlama Yanma	5-30	10-40	20-75	25-90
Enerjisine Dönüştürme Anaerobik Aritma	NA	20-80	50-100	65-150

Tablo 2. Kırtı atık yönetiminin 2010-2025 yıllarına göre tahminleri [8].

Table 2. Estimations of solid waste management for the years 2010-2025 [8].

Ülke Gelir Grubu	2010 Maliyeti	2025 Maliyeti
Düşük Gelirli Ülkeler	1.5 Milyar \$	7.7 Milyar \$
Orta Altı Gelirli Ülkeler	20.1 Milyar \$	84.1 Milyar \$
Orta Üstü Gelirli Ülkeler	24.5 Milyar \$	63.5 Milyar \$
Yüksek Gelirli Ülkeler	159.3 Milyar \$	220.2 Milyar \$
Toplam 1 Maliyet (US\$)	205.4 Milyar \$	365 Milyar \$

2.3 Akıllı çöp konteynerleri

Akıllı çöp konteynerlerinin normal çöp konteynerlerinden farkı içerisindeki atığın miktarının anlık olarak ölçülebilmesidir.

Normal çöp konteynerlerinin içerisine yerleştirilecek olan ufak bir sensör sayesinde normal konteynerler akıllı konteynerler haline gelebilmektedir. Bu sayede geliştirilecek algoritmalar ile yönlendirilen süreçte dolmayan çöp kutuları ya da az miktarda dolan çöp kutuları rotaya dahil edilmez ve o noktada aracın durması engellenerek lojistik maliyetlerin azaltılması hedeflenmektedir.

Normal çöp konteynerlerinin akıllı konteynerlere dönüştürülmesi için birkaç inovatif çözüm gerekmektedir. Öncelikle çöp konteynerlerine yerleştirilen sensörler ile toplamaya çıkmadan önce rotası oluşturulacak olan çöp kamyonu arasında nesnelerin interneti (IoT) olarak isimlendirilen dijital bir sistem kurulmalıdır. IoT kullanan sensörler bütün konteynerlere eklenerek hem birbirleriyle hem de bağlanabilecekleri herhangi bir yerel ağ üzerinden (wifi) ana merkeze verilerin iletilmesini sağlar. IoT sistemlerinde birçok sensör tipi olup bu çalışma için seviye sensör tipinin kullanılması uygun görülmüştür.

Nesnelerin İnterneti (IoT), çevredeki nesnelerin kullanıcı müdahalesi olmaksızın kablolu ve kablosuz ağlar aracılığıyla birbirine bağlandığı bir kavramdır. IoT alanında, nesneler, kullanıcılar için gelişmiş akıllı hizmetler sağlamak için iletişim kurar ve bilgi alışverişinde bulunur. Wi-Fi ve LTE gibi iletişim ağı teknolojileri ile çeşitli sensörler ve iletişim modülleriyle donatılmış mobil cihazlarda son zamanlardaki gelişmeler sayesinde, IoT daha fazla alanda kullanılmaya başlanmıştır [9].

2.4 Araç rotalama problemi

Araç rotalama problemi ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında yayınlanan "The Truck Dispatching Problem" isimli çalışmalarında bahsedilmiştir [10]. Daha sonrasında Clarke ve Wriğth, Dantzig ve Ramser'in çalışmasını geliştirerek klasik tasarruf algoritmasını geliştirmişlerdir [11]. Clarke ve Wriğth'in yaptıkları çalışma ile araç rotalama probleminin çözüm yöntem uzayına yeni bir bakış açısı getirdikleri söylenebilir. Bu çalışmalar sayesinde günümüze kadar birçok bilim insanı tarafından ARP çözümleri için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Temelde araç rotalama problemleri tek depodan müşterilere ürün toplama ve taşıma optimizasyonu olarak tanımlanabilir.

ARP, maliyet fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlayan bir eniyileme problemidir. Bunun yanında belirli kısıtlar ile problem genişletilebilmektedir. Günümüzde lojistik problemlerinde kullanılan ARP'nin amacı maliyetlerin azaltılmasıdır. Ulaşım/lojistik maliyetleri firmaların üzerinde oldukça büyük bir yük konumundadır. Bir ürünün maliyetinin yaklaşık %10'unu ulaşım maliyeti oluşturmaktadır [12].

Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminde sefer içerisinde bulunan filoya ait bütün araçların kapasitelerinin eşit olduğu kabul edilir. Her bir aracın başlangıç ve bitiş noktası depodur. Her müşteriye ait talep tek bir sefer üzerinden gerçekleştirilir. Toplam talep miktarı toplam araç kapasitesini geçmemelidir. Müşteri taleplerinin ve araç kapasitelerinin bilindiği bu problemde amaç fonksiyonu yol mesafesinin minimize edilmesidir. Aşağıda kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin matematiksel modeli açıklanmıştır.

$$V = \{v_0, v_2, \dots, v_n\} \quad v_0 = Depo$$

$$g_i: i. \text{düğümdeki müşteri talebi}$$

$$K: \{k_1, k_2, k_3 \dots k_m\} \text{ araç filosu}$$

$$Q: \text{Araç kapasitesi } k_i \in K$$

d_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki mesafe

Karar değişkenleri:

$$x_{i,j}^k \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ düğümünden sonra } j \text{ düğümünü} \\ & \text{ziyaret ediyorsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$y_i^k \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ düğümüne hizmet verirse} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{i,j}^k \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{i,j}^k + \sum_{j \in V} x_{j,i}^k = 1 \quad \forall i \in V, \quad k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{0,j}^k = K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0,j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{j,n+1}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_{i,j}^k = 1 \rightarrow y_i - q_i = y_j, \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (7)$$

$$y_0 = Q, 0 \leq y_i \quad \forall i \in V \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V} q_i \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{i,j}^k \leq Q \quad k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (9)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (10)$$

Yukarıda denklemler incelendiğinde; denklem (1) toplam araç sayısının ve toplam mesafenin minimize edilmesini, denklem (2) her bir i - j düğüm çiftine tek bir aracın hizmet vermesini, denklem (3) seferdeki araçların bir kez kullandıkları yolların tekrar kullanılmasına izin olmadığını, denklem (4) başlangıç noktasından çıkan araç sayısı ile bitiş noktasına gelen araç sayısının eşit olmasını, denklem (5) ve (6) aracın depodan ve j düğümünden sadece bir kez çıkış yapacağını, denklem (7) seferdeki aracın i - j düğümlerinde seyahati sırasında i düğümdeki mevcut kapasitesini ve j düğümüne geldiğindeki kalacak kapasiteyi, denklem (8) her bir aracın başlangıç kapasitesinin Q olduğunu, denklem (9) seferdeki tek bir araca atanan müşterilerin toplam talebinin araç kapasitesini geçmeyeceğini ve denklem (10) $x_{i,j}^k$ değişkeninin tam sayı olma zorunluluğunu ifade etmektedir.

Araç rotalama yapılırken problemin ana bileşenleri olan ürünlerin talep yapısı, taşınacak ya da toplanacak olan ürünün çeşidi/türü, dağıtımın ya da toplanmanın gerçekleştirileceği noktalar kümesi, araç çeşidi gibi değişkenler problemin kısıtlarını değiştirebilmektedir. Dinamik ve statik olarak iki

dala ayrılan problemin, kısıtları arttıkça çeşitlenmektedir. Dinamik Araç Rotalama Problemi (DARP), aracın rotalaması sırasında ihtiyaç duyulan verilerin dinamik olarak ortaya çıkması olarak açıklanmaktadır. Araç rotalama problemine ilişkin varyasyonlarla ilgilenen okuyucular detaylı sınıflandırmalar için Braekers ve diğ. [13] ve Eksioğlu ve diğ. [14] tarafından gerçekleştirilen literatür taramasına ulaşabilirler.

2.5 ARP Çözüm yöntemleri

Araç rotalama problemlerinin çözümünde kullanılan kesin, sezgisel ve metasezgisel olmak üzere üç alternatif yöntem kullanılmaktadır.

Kesin çözüm yöntemleri en iyi çözümün bulunacağını garanti etmektedir. Burada problem büyüklüğü ile çözüm süresi arasında ters orantı mevcuttur. Problem boyutunun küçük ve orta olduğu durumlar için kullanımları uygundur. Her ARP'yi doğrulukla çözebilen kesin çözüm yönteminin olmadığı bilinmektedir [15]. Kesme düzlemi ve Dal-Sınır algoritması küçük boyutlu ARP'lerin çözümünde kullanılan bilinen kesin çözüm algoritmaları arasındadır. Bu algoritmaların probleme uygulanması sırasında GAMS, LINGO, IBM ILOG CPLEX, GUROBI gibi paket programlardan yararlanılmaktadır.

ARP çözümlerinin çok uzun zaman alması ve sadece orta ve küçük boyuttaki problemlerin çözümünde hızı ve etkili sonuçlar alınması sebebiyle örneklem uzayı büyük olan problemlerde sezgisel yöntemler ile yaklaşık optimal değerlere yakın çözümler elde edilebilmektedir.

Meta sezgisel yöntemler, kesin çözüm yöntemleri ile çözüldüğünde çok uzun sürelerde çözülebilecekleri problemleri daha kısa sürede çözümünü sağlayan ve genellikle doğadan örnek alınarak oluşturulan algoritmalarıdır. Çözülmesi istenilen problemin sonuçlarına dair en ufak bir tasarı olmadan büyük boyutlardaki karmaşık optimizasyon problemlerinin geniş arama uzayı sayesinde çözülebilmeye fırsat tanımaktadır. Meta sezgisel algoritmalarda çalışma prensibi iki aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar çeşitlendirme (diversification) ve yoğunlaştırma (intensification) ilkeleridir. Çözüm uzayı içerisinde bir konumdan başka bir konuma geçme ve yeni konumun komşuluklarının ayrıntılı olarak taranmasıdır. Bu ilkelere göre tasarlanmış bir meta sezgisel algoritmanın yerel optimuma takılmadan bütünü çözüm uzayının araması beklenmektedir [16]. Literatürde araç rotalama problemlerinin çözülmesi için Genetik Algoritma, Tabu Arama, Benzetimli Tavlama, Karınca Kolonisi Optimizasyon Yöntemi, Yapay Arı Kolonisi, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Değişken Komşuluk Arama, Büyük Komşuluk Arama gibi metasezgisel algoritmalarından yararlanılmıştır [17],[18]. Araç rotalama probleminin metasezgiseller ile çözülmesine ilişkin detaylı literatür taramasına Konstantakopoulos ve diğ. [19], Elshaer ve diğ. [20] ve Bräysy ve Gendreau [21] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan ulaşabilirler. Bu çalışma kapsamında detaylı literatür taramalarında da etkinliği ispatlanan ve farklı problem varyantlarına uygulama kolaylığı bulunan Genetik Algoritma yaklaşımı ele alınan problemin çözümünde kullanılmıştır.

Genetik Algoritma (GA): Genetik algoritmalar en iyinin korunumuna ve doğal seçim ilkelerine dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma evrim teorisinde en iyi olan bireyin hayatta kalma ve genlerini bir sonraki nesle aktarma olasılığının fazla olması esasına dayanmaktadır [22]. Algoritmadan ilk olarak 1960'lı yıllarda Rechenberg'in "Evrimsel Stratejileri" çalışmasında bahsedilmiştir. 1975 yılında John

Holland tarafından geliştirilen GA'nın bugünkü temel ilkelerinden "Doğal ve Yapay Sistemlerde Adaptasyon" isimli kitapta bahsedilmiştir. Holland, makine öğrenmesi üzerine çalıştığı projesinde evrim kuramından etkilenerek canlılarda yaşanan genetik süreçleri bilgisayar ortamına aktarmaya çalışmıştır [22]. GA evrim teorisindeki süreci simüle ederek optimum çözümü bulmaya çalışan, problem tipinden, kullanılan kodlama tekniğinden ve operatörlerden bağımsız olarak çalışan dinamik bir yaklaşıma sahip optimizasyon yöntemidir. GA'nın en temel özelliği popülasyonun gittikçe yakınsanması yani uniform bir hale gelmesidir. Algoritmaya rasgele bir popülasyon ile başlandığında belli bir nesil sonrasında popülasyon üyelerinin birbirlerine benzedikleri ve uygunluk değerinin popülasyon içerisinde dengede kaldığı görülmektedir [23],[24].

Standart bir GA'nın çalışma prensibi aşağıdaki gibidir [25]:

- Olası kromozomların kodlandığı bir popülasyon oluşturulur. Popülasyondaki birey sayısı için herhangi bir kısıt bulunmamaktadır. Popülasyon rastsal olarak klasik sezgisellerde üretilir,
- Popülasyondaki her bir kromozomun uygunluk değerleri hesaplanır. Uygunluk değerlerinin bulunmasını sağlayan fonksiyona uygunluk fonksiyonu adı verilir. GA'da problem özelinde değişen tek kısım uygunluk fonksiyonudur,
- Popülasyon içerisindeki kromozomlar uygunluk değerlerine göre rastsal olarak seçilerek eşleşme yapılır. Eşleşmenin ardından çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin sonucunda seçim operatörlerinden biri ile yeni bir toplum oluşturulur,
- Popülasyon sayısının sabit kalabilmesi için yeni bireyler popülasyona girerken eski bireyler elenir. Tüm kromozomların uygunluk değerleri yeniden hesaplanır ve toplumun uygunluğu tespit edilir,
- Popülasyon için belirlenen nesil sayısı boyunca bu işlemler tekrarlanır ve en iyi olan nesil bulunmaya çalışılır. Uygun neslin bulunması ile problem sonuçlanır.

Yukarıda dinamik araç rotalama problemlerinin çözüm yöntemleri için yapılan çalışmalar araştırılmış ve incelenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalara ait literatür taramasının sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Tian ve diğ. [26] çalışmasında tek araçlı olarak DARP yöntemlerini çalışmışlardır. KKA'da yerel arama yöntemleri ile sonuçlarda eniyilemeye gidilmiştir. Algoritmada dinamiklik parametresi feromonlar üzerinden güncellenmiştir. Taniguchi & Shimamoto [27] çalışmalarında akan trafiğin dinamik gerçek zamanlı olarak modellenmesi işlenmiştir. Yolculuk zamanları anlık olarak güncellenmiştir. Yolculuk sürelerinin hesaplanmasında eski verilerden elde edilen veriler ışında yolculuk tahminleri oluşturularak zaman pencereci ARP olarak modellenmiştir. Araçların güzergahları belirlenirken GA optimizasyon yöntemlerinden yararlanılmıştır. İkinci bir model olarak anlık veriler kullanılarak yolculuk süreleri yine ZPARP olarak modellenmiş ve iki model birbirleri ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonucunda dinamik olarak oluşturulan modelin sonuç maliyetlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Fleischmann ve diğ. [28] yaptıkları çalışmada ZPARP optimizasyon yöntemi kullanılmış ve mevcutta olan bir problem örneği ile çalışılmıştır. Çalışılan problemde trafik verileri göz önünde bulundurularak iki nokta arasındaki yolculuk süresinin zamana bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Du ve diğ. [29] çalışmalarında ürünlerin üreticilerden aracı olmaksızın direkt tüketiciye aktarıldığı e-ticaret uygulaması için ARP çözümlenmesi yapılmıştır. Çözüme üç aşama ile ulaşılmaktadır. Öncelikle ilk rotalar kümeleme yöntemi

kullanılmıştır. Kümelenmiş olan her müşteri noktalarına tek bir araç hizmet etmektedir. Müşteriler ortaya çıkma zamanlarına göre sıralanır, yani ilk gelene önce uğranılır. Rotaya müşterilerin eklenmesinde ilk uygun rotaya son uğranılacak nokta olarak eklenilir veya tüm rotalar incelendikten sonra en uygun olanına eklenir. Ardından rota kümeleri arasında ve içerisinde eniyileme çalışması gerçekleştirilir. Son olarak veriler simüle edilerek bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Wang ve diğ. [30] çalışmalarında belirli bir dönemi veya ardışık günleri baz alarak müşterilerin taleplerinin istenilen zamanlarda teslimatların yapılması gerektiği üzerine DARP çözümleri geliştirmişlerdir. Müşterilerin taleplerinin dinamik olarak fark gün ve servis zamanlarında olacağı kabulüne göre karma tam sayılı doğrusal programlama problemi olarak çözüm yöntemine ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu toplam yolculuk maliyetlerinin azalması ve müşterilerin beklenen servis sürelerindeki gecikmelerin minimuma düşürülmesi amaçlanmıştır. Khouadja ve diğ. [31] çalışmalarında kapasite kısıtlı DARP çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Daha öncesinde Montemanni ve diğ. [32] geliştirmiş oldukları KKA ile DARP çözümünde kullandıkları planlama dönemlerinin alt zaman dilimlerine ayrılması ile elde edilen statik problemlerin çözüm yöntemi yaklaşımından yararlanmışlardır. Statik problemi popülasyon tabanlı PSO olarak ve tek çözüm tabanlı değişken komşuluk arama yöntemi ile çözümlenmiştir. PSO uygulamalarına dinamik parametrelerin girilmesi ile DAPSO olarak adlandırılmaktadır. Problemin çözümünde yerel arama algoritmalarından 2-opt yöntemi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanarak sunulmuştur. Polat ve diğ. [33] DARP uygulamalarından olan süt toplama probleminin çözümü için bir matematiksel model önermişlerdir.

Bu çalışmada ARP çözüm yöntemlerinden GA yöntemi tercih edilmiştir. Bu çalışmada GA seçilmesinin sebepleri ve diğer arama yöntemlerinden ayıran özellikler aşağıda verilmiştir:

- GA parametreleri setlerinin kodları ile ilgilenir, parametrelerin kendileri ile direk olarak ilgilenmez,

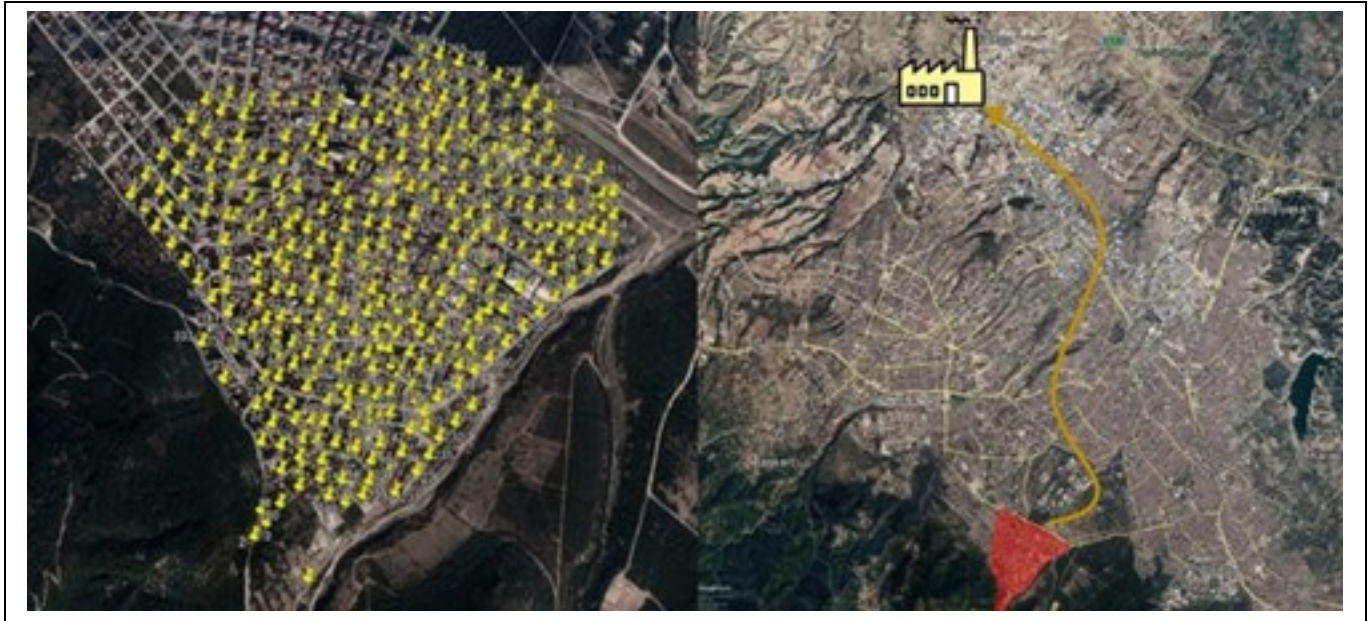
- GA'nın arama alanı popülasyonun tamamıdır. Tek nokta ya da noktalarda (çözüm kümesinin daraltılmış bölgelerinde) arama yapılmaz,
- GA'da amaç fonksiyonu kullanılır, sapma değerleri ya da diğer hata faktörleri kullanılmaz,
- GA uygulamasında kullanılan operatörler, stokastik yöntemlere dayanır, deterministik yöntemler kullanılmaz [34],
- GA uzun zamandır birçok optimizasyon probleminde kullanılmış olup başarılı sonuçlar elde edilen bir meta sezgisel yöntemdir [35],[36].

3 Metodoloji

Bu çalışma kapsamında katı atık lojistiği optimizasyon probleminin ARP çözüm yöntemi ile sonucuna varılması planlanmıştır. ARP terminolojisinde kullanılan müşteriler örnek uygulamadaki çöp konteynerlerini, müşteri talepleri ise konteynerlerin içerisindeki çöp miktarlarını temsil etmektedir.

3.1 Çalışma bölgesi

Gerzele Mahallesi Denizli ilinin Merkezefendi ilçesine bağlı olan şehrin güney ucunda bulunmaktadır. 2020 yılı TÜİK ADNKS verilerine göre toplam nüfusu 13913 kişi olup nüfus yoğunluğu 818 kişi/km² olduğu ve mahalleye ait ortalama hanehalkı sayısının 3.3 kişi olduğu belirlenmiştir [1]. Çalışmada bu bölgenin seçilmesindeki en büyük etken bu mahallenin Merkezefendi ilçesindeki diğer mahalle nüfusları ile kıyaslandığında nüfusunun ortalama bir değere sahip olması sebebiyle ortalama değerleri yansıtacağı düşünülmüştür. Gerzele Mahallesi ait çöp konteyner konumları aşağıda verilmiştir (Bkz. Şekil 4). Her bir konteynerin yeri tam olarak saptanamadığı için her sokakta olmak koşuluyla yaklaşık her 75 m aralıklı olacak şekilde çöp konteyneri atanmıştır. Konteynerlerden toplanan çöpler Denizli Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'na taşınmaktadır. Depolama sahası ile mahalle arası yaklaşık 15 km olarak hesaplanmıştır. Hesaplar yapılırken harita üzerindeki gerçek uzunluklar kullanılmıştır.



Şekil 4. Gerzele mahallesi çöp toplama noktaları ve Denizli katı atık düzenli depolama sahası.

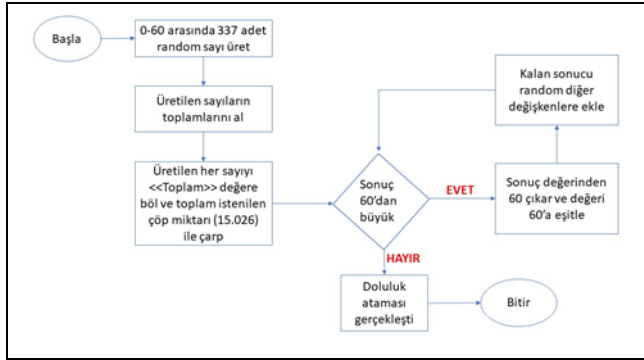
Figure 4. The garbage collection points for Gerzele neighborhood and the Denizli solid waste landfill site.

3.2 Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde çöp toplama optimizasyonu için oluşturulan, kullanılan parametreler ve operatörler için belirlenen yöntemler ve kabuller açıklanmıştır.

3.2.1 Çöp doluluk oranlarının rastgele atanması

Çöp doluluk oranlarının rastgele atama yapılırken mahallenin nüfusu ve günlük üretilen çöp miktar ve konteyner sayıları dikkate alınmıştır. Ayrıca konteynerler lt birimine sahipken üretilen günlük çöp miktarı kg cinsindedir. Bu sebepten ötürü lt-kg arasında bir dönüşüm yapılmıştır. Katı atık kompozisyonları ile ilgili özgül ağırlık hesapları incelenmiştir. İncelenilen çalışmalardan birinde 10 farklı katı atık materyalinin özgül ağırlık değerleri ASTM D854 (Standard method of test for specific gravity of soil solids by water pycnometer) standartlarına uygun olarak belirlenmiş ve literatürde geçen katı atık özgül ağırlık değerlerine oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. Doğal atık depolama sahasından alınmış taze doğal, yıllanmış ve sentetik numunelerin özgül ağırlık değerlerinin sırasıyla 0.85-0.97-1.09 değerler oldukları belirtilmiştir [37]. Bu çalışmaya dayanarak katı atık özgül ağırlığı 1 kabul edilmiştir. Denizli Gerzele Mahalle nüfusunun 13913 kişi ve günlük üretilen çöp miktarının 15026 kg olduğunu hesaplanmıştır. 337 adet konteyner noktasına rastgele doluluk oranlarının algoritma akış şeması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Rastgele koşullu çöp üretme algoritma akış şeması.

Figure 5. Random conditional garbage generation algorithm flowchart.

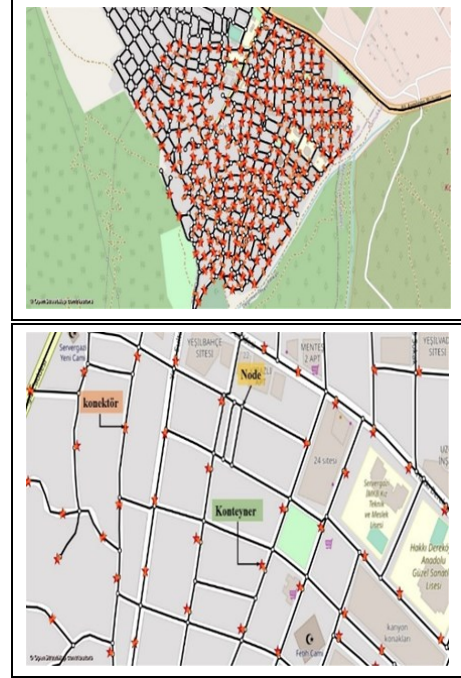
3.2.2 Mesafe matrisinin oluşturulması

Mesafe matrisinin (Distance Matrix) gerçek değerleri yansıtılması adına VISUM programına daha öncesinde Google Eart Pro programına enlem ve boylam değerleri işlenmiş olan konteyner noktaları zone olarak eklenmiştir. Gerzele mahallesine ait ulaşım modeli oluşturulmuş ve her bir yol için yol sınıflandırması yapılarak hız sınırları oluşturulmuştur. Çöp konteynerleri yollara (line) en yakın yol noktasına konektörler aracılığıyla (node'lara) bağlanmıştır. Özel araç skim matris (Prt Skim Matrix) atanması yapılmış ve mesafe matrisi oluşturulmuştur. Aşağıda ulaşım ağ modeli ve mesafe matrisine ait görseller Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

3.2.3 Problem çözümünde kullanılan GA parametre ve operatörleri

Çalışma kapsamında DARP için seçilmiş olan GA çözümü problem özelinde geliştirilmiş olup doluluk durumuna göre

koşullandırılmıştır. Problemin çözümünde kullanılan algoritmanın akış şeması aşağıdaki Şekil 8'de verilmiştir.



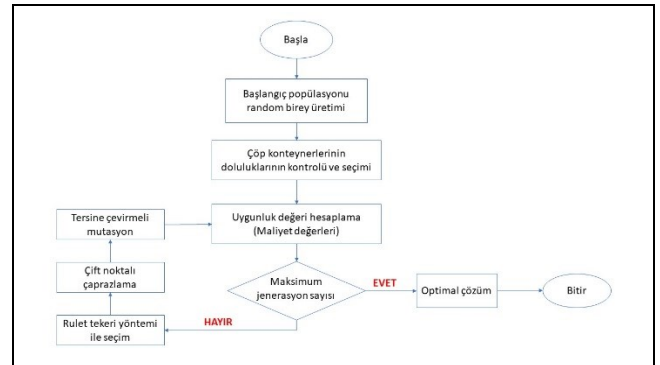
Şekil 6. Gerzele mahalle'si Visum yazılım ulaşım ağ modeli.

Figure 6. Visum software transportation network model for Gerzele neighborhood.

338 x 338	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	14.15	14.16	14.09	14.18	14.15	14.14	14.06	13.99	14.07	14.08	14.01	14.02	14.07	14.15
2	14.15	0	0.09	0.07	0.26	0.26	0.16	0.24	0.46	0.22	0.27	0.15	0.22	0.25	0.17
3	14.16	0.09	0	0.08	0.08	0.18	0.16	0.17	0.26	0.36	0.29	0.17	0.23	0.31	0.26
4	14.09	0.07	0.08	0	0.20	0.24	0.09	0.18	0.33	0.25	0.21	0.09	0.15	0.23	0.24
5	14.18	0.26	0.18	0.20	0	0.00	0.12	0.13	0.28	0.20	0.21	0.18	0.26	0.32	0.41
6	14.15	0.25	0.16	0.24	0.12	0	0.00	0.21	0.24	0.21	0.22	0.31	0.29	0.36	0.43
7	14.14	0.16	0.17	0.09	0.10	0.21	0.00	0.08	0.24	0.16	0.17	0.08	0.15	0.22	0.31
8	14.06	0.24	0.26	0.18	0.13	0.24	0.08	0	0.16	0.08	0.09	0.16	0.23	0.30	0.39
9	14.07	0.22	0.33	0.25	0.20	0.22	0.16	0.08	0.09	0.00	0.09	0.22	0.24	0.31	0.40
10	14.07	0.27	0.29	0.21	0.21	0.31	0.17	0.08	0.17	0.09	0.00	0.13	0.15	0.22	0.31
11	14.08	0.27	0.29	0.21	0.21	0.31	0.17	0.08	0.17	0.09	0.00	0.13	0.15	0.22	0.31
12	14.01	0.15	0.17	0.09	0.18	0.29	0.08	0.16	0.30	0.22	0.13	0.00	0.08	0.16	0.24
13	14.02	0.22	0.23	0.15	0.25	0.36	0.15	0.23	0.32	0.24	0.15	0.08	0.00	0.08	0.17
14	14.07	0.25	0.31	0.23	0.32	0.43	0.22	0.30	0.38	0.31	0.22	0.16	0.08	0.00	0.09
15	14.15	0.17	0.26	0.24	0.41	0.42	0.31	0.39	0.48	0.40	0.31	0.24	0.17	0.09	0.00
16	14.13	0.10	0.18	0.16	0.35	0.34	0.25	0.33	0.42	0.34	0.25	0.19	0.20	0.16	0.08
17	14.05	0.13	0.22	0.18	0.27	0.38	0.17	0.25	0.34	0.26	0.17	0.10	0.12	0.19	0.16
18	14.17	0.08	0.17	0.15	0.34	0.33	0.24	0.32	0.46	0.38	0.29	0.23	0.24	0.25	0.17
19	14.26	0.17	0.26	0.24	0.43	0.42	0.33	0.41	0.55	0.47	0.38	0.32	0.33	0.34	0.26
20	14.34	0.26	0.34	0.30	0.45	0.44	0.41	0.50	0.63	0.55	0.46	0.40	0.41	0.42	0.34
21	14.44	0.27	0.36	0.35	0.46	0.45	0.41	0.50	0.63	0.55	0.46	0.40	0.41	0.42	0.34
22	14.10	0.37	0.29	0.36	0.24	0.13	0.28	0.20	0.12	0.14	0.22	0.35	0.36	0.44	0.53
23	14.02	0.42	0.33	0.40	0.28	0.17	0.33	0.25	0.12	0.18	0.26	0.39	0.41	0.48	0.57
24	13.91	0.48	0.41	0.42	0.35	0.25	0.32	0.24	0.09	0.17	0.26	0.39	0.40	0.48	0.57
25	14.29	0.55	0.48	0.48	0.43	0.33	0.39	0.31	0.17	0.24	0.32	0.46	0.47	0.54	0.63
26	13.78	0.63	0.56	0.56	0.51	0.41	0.47	0.39	0.26	0.32	0.41	0.52	0.53	0.61	0.69
27	13.74	0.63	0.64	0.56	0.51	0.48	0.47	0.39	0.32	0.40	0.41	0.50	0.51	0.59	0.67
28	13.76	0.65	0.67	0.59	0.51	0.56	0.53	0.45	0.40	0.45	0.47	0.51	0.53	0.57	0.65
29	13.69	0.61	0.62	0.54	0.59	0.64	0.63	0.46	0.40	0.47	0.45	0.47	0.48	0.52	0.61
30	14.43	0.63	0.64	0.57	0.51	0.70	0.56	0.49	0.56	0.49	0.48	0.49	0.50	0.48	0.56

Şekil 7. Mesafe matrisine ait görsel (metre).

Figure 7. Visual representation of the distance matrix (metre).



Şekil 8. Problem için geliştirilen GA akış şeması.

Figure 8. Flowchart of the developed GA for the problem.

Bu çalışmada kullanılmasına karar verilen GA optimizasyon yönteminin parametreleri ve operatörlerinin nasıl işledikleri sonraki bölümde açıklanmıştır.

4 Analiz

Çalışma bölgesi bilgileri ışığında problemin çözüm yöntemleri belirlenmiş ve uygulama yolları bu başlık altında açıklanmıştır. Bu bölümün içerisinde çöp doluluk hesaplarının nasıl yapıldığı ve problemin çözümünde kullanılan GA'nın nasıl uygulandığı alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.1 Çöp miktarı ve konteyner doluluk hesapları

TÜİK 2018 yılı belediye atık istatistiklerine bakıldığında Denizli ili için günlük kişi başına düşen atık miktarının 1.08 kg olduğu belirlenmiştir [2]. Gerzele Mahallesi'nin nüfusunun 2020 yılı için 13913 kişi olduğu bilindiğine göre günlük oluşan çöp miktarının 15,026.04 kg'a karşılık geldiği hesaplanmıştır. Konteynerler Google Earth Pro programı üzerine işaretlenmiş ve koordinat değerleri aşağıda verilmiştir. Ayrıca her bir konteynerin doluluk oranının bilinmemesinden dolayı toplam hesaplanan 15,026.04 kg'lık çöp, random olarak her bir konteynerin kapasitesi olan 60 l'yi aşmayacak şekilde atanmış ve aşağıdaki tabloda "Doluluk" başlığı altında verilmiştir. Denizli Büyükşehir Belediyesi'nden elde edilen bilgiye göre

Gerzele mahallesinde çöplerin 2-3 günde bir toplandığı öğrenilmiştir. Bu sebepten ötürü konteyner kapasitesi 60 lt, çöp araçlarının kapasitesi ise 10 ton olduğu Tablo 3 ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Hesaplar yapılırken toplam konteynerlerin içerisindeki çöp miktarlarının toplamı, günlük üretilen çöp miktarına (15,026.04 kg) eşitlenmiştir.

Tablo 3. Mahalleye ait çöp bilgileri.

Table 3. Waste information related to the neighborhood.

Denizli Gerzele Mah. Nüfusu	13913
Denizli Kişi Başına Düşen Atık Miktarı	1.08 kg/kişi
Günlük üretilen çöp miktarı	13913 x 1.08 = 15026.04 kg
Çöp konteyner sayısı	337 adet
Çöp konteyner hacmi	60 lt
Ortalama konteyner başına düşen günlük çöp miktarı	15026/337 = 45 kg

Tablo 4. Örnek alana ait çöp konteynerlerinin koordinat değerleri ve dolulukları.

Table 4. The coordinate values and fill levels of waste containers in the sample area.

ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)
0-Depo	0	49	34	98	34	147	43	196	59	245	33	294	50
1	60	50	59	99	9	148	60	197	20	246	42	295	13
2	20	51	60	100	58	149	38	198	45	247	60	296	21
3	20	52	37	101	60	150	60	199	18	248	47	297	60
4	60	53	52	102	57	151	60	200	38	249	34	298	60
5	60	54	60	103	12	152	26	201	50	250	13	299	60
6	36	55	11	104	60	153	53	202	60	251	36	300	60
7	60	56	60	105	53	154	60	203	26	252	60	301	38
8	60	57	55	106	60	155	60	204	60	253	60	302	35
9	21	58	60	107	60	156	60	205	52	254	60	303	50
10	15	59	60	108	46	157	19	206	38	255	60	304	55
11	41	60	49	109	60	158	47	207	60	256	25	305	43
12	29	61	60	110	51	159	18	208	60	257	23	306	50
13	60	62	8	111	28	160	60	209	23	258	12	307	59
14	35	63	60	112	54	161	60	210	13	259	26	308	44
15	60	64	60	113	6	162	28	211	20	260	60	309	60
16	36	65	54	114	14	163	36	212	19	261	60	310	31
17	60	66	60	115	60	164	60	213	13	262	60	311	60
18	14	67	60	116	60	165	42	214	60	263	60	312	28
19	8	68	25	117	51	166	60	215	60	264	35	313	46
20	22	69	57	118	60	167	49	216	37	265	13	314	60
21	19	70	55	119	5	168	35	217	60	266	33	315	38
22	16	71	60	120	60	169	60	218	49	267	9	316	60
23	60	72	60	121	60	170	60	219	60	268	60	317	27
24	60	73	42	122	40	171	60	220	24	269	60	318	60
25	60	74	52	123	32	172	36	221	38	270	53	319	60
26	60	75	28	124	51	173	56	222	20	271	24	320	60
27	43	76	12	125	60	174	31	223	41	272	60	321	60
28	60	77	8	126	60	175	32	224	58	273	30	322	37
29	45	78	60	127	60	176	25	225	44	274	11	323	26
30	60	79	60	128	60	177	36	226	36	275	5	324	27
31	39	80	60	129	19	178	60	227	53	276	60	325	60
32	35	81	44	130	15	179	57	228	27	277	53	326	60
33	56	82	57	131	10	180	60	229	58	278	41	327	29
34	14	83	31	132	9	181	60	230	13	279	52	328	58
35	52	84	60	133	60	182	22	231	60	280	60	329	60
36	58	85	60	134	16	183	56	232	40	281	60	330	60
37	60	86	60	135	60	184	60	233	60	282	60	331	16
38	60	87	60	136	47	185	60	234	47	283	39	332	60
39	60	88	42	137	60	186	35	235	42	284	54	333	60
40	27	89	47	138	60	187	23	236	34	285	47	334	9
41	35	90	9	139	60	188	60	237	60	286	39	335	58

Tablo 4. Devamı.

Table 4. Continued.

ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)	ID	Doluluk (lt)
42	60	91	42	140	48	189	32	238	60	287	60	336	22
43	60	92	15	141	60	190	8	239	60	288	12	337	59
44	27	93	53	142	37	191	11	240	60	289	60		
45	36	94	49	143	22	192	60	241	60	290	60		
46	60	95	60	144	48	193	60	242	60	291	18		
47	46	96	39	145	39	194	60	243	15	292	60		
48	17	97	30	146	36	195	51	244	8	293	60		

4.2 Problemin GA uygulanması

Bu çalışmada Denizli ilinin Merkezefendi ilçesinde bulunan Gerzele Mahallesi için çöp toplama optimizasyonunun, araç rotalama probleminin meta sezgisel çözüm yöntemlerinden genetik algoritma metodu kullanılmış ve algoritmanın içerisinde kullanılan yöntemler bir önceki bölümde aktarılmış olup probleme uygulanışı bu bölümde açıklanmıştır. Algoritma ve çözümü Python programı üzerinden kodlanmıştır. Çalışmada kullanılan genetik algoritmanın doğruluğunun test edilebilmesi için literatürde bulunan Solomon [38]'un oluşturdu 6 problem veri setinden yararlanılmıştır. Bu veri setleri R1, C1, RC1, R2, C2, RC2'dir. Bu problem setleri oluşturulurken aşağıdaki kriterler göz önüne alınmıştır:

- Coğrafi veriler,
- Tek bir aracın hizmet verdiği müşteri sayısı,
- Zaman kısıtlı müşterilerin sayıları,
- Zaman penceresinin sıklığı ve konumlandırılması.

Solomon [38]'un yapmış olduğu çalışmada bulunan 6 veri setlerinde, coğrafi veriler R1 ve R2 problem setlerinde rastgele oluşturulur, C1 ve C2 problem setlerinde kümelenir ve RC1 ve RC2 tarafından problem setlerinde rastgele ve kümelenmiş yapılan karışımı olarak karşımıza çıkar. Bu setlerden R1, C1 ve RC1 kısa rotalama ufkuna sahip olup sadece birkaç müşteriye (5-10) hizmet vermektelerdir. R2, C2 ve RC2 veri setlerine bakıldığında birçok müşteriye (30'dan fazla) aynı araç ile hizmet verilmesine imkân veren uzun rotalama ufkuna sahip oldukları görülür [38]. Müşterilerin koordinatları her bir tip veri setinde aynıdır. Problemler zaman penceresinin genişliklerine göre çeşitlenmektedir. Bazı veri setlerinde çok dar zaman penceresi mevcutken bazı veri setlerinde zaman pencereleri çok fazla kısıtlayıcı rolünde değildir. Zaman penceresi yoğunlukları yani zaman penceresine sahip müşterilerin yüzdeleri %25, %50, %75 ve %100 olan problemler yaratılmıştır [38]. Çalışma kapsamında c204 No.lu veri seti kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda verilerin python programına nasıl girildiklerine dair taslak Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. C204 No.lu veri setinin program formatı.

Table 5. The data format for the C204 dataset in the program.

Müşteri Numarası	X Koordinatı	Y Koordinatı	Talep	Başlangıç Zamanı	Son teslim Zamanı	Servis Süresi
0	x0	y0	q0	e0	l0	s0
1	x1	y1	q1	e1	l1	s1
...
100	x100	y100	q100	e100	l100	s100

Test denemesinde kullanılan C204 veri seti için kullanılan GA parametreleri aşağıdaki verilmiştir.

Birey sayısı: 100 Başlangıç maliyeti: 100 birim

Popülasyon büyüklüğü: 400 Birim başı maliyet: 8 birim
Çaprazlama oranı: 0,85 Bekleme maliyeti: 1 birim

Mutasyon oranı: 0,02 Gecikme maliyeti: 1,5 birim
Jenerasyon sayısı: 300

Bu parametrelere göre çalıştırılan python programında rotalar oluşturulmuş ve Solomon'un örnek veri seti sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Toplamda algoritmaya 25 araç tanımlanmış ve her bir aracın kapasitesi 700 birim atanmıştır. 100 müşteri için toplam talep 1810 olduğu belirlenmiştir. Algoritmanın çalıştırılması sonucunda toplamda 3 rota oluşmuştur. Her bir aracın dolulukları aşağıda 0'da verilmiştir.

Tablo 6. C204 örnek çalışmasının sonuçları.

Table 6. The results of the C204 sample study.

Araç Numarası	Araç kapasitesi	Topladığı Talep	Doluluk Oranı
Araç 1	700	630	%90
Araç 2	700	610	%87
Araç 3	700	570	%81

Bu test çalışmasının sonuçları oluşan rotalar ve doluluklar incelendiğinde Solomon'un C204 No.lu örnek çalışmasının sonuçları ile karşılaştırılmış rotalarda ufak farklılıklar olduğu fakat genel manada benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır [39].

1. Aracın doluluk oranı: %90,
2. Aracın doluluk oranı: %87,
3. Aracın doluluk oranı: %81 olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan GA operatörleri ile testte kullanılan operatörler aynı alınmıştır. Ayrıca test çalışmasının kısıtlarından olan bekleme süresi gecikme süresi hizmet zamanı gibi kısıtlar bu çalışmaya eklenmemiştir. Zaman penceresi kısıtlamaları etkisiz hale getirilerek hizmette gecikme durumunun ceza puanları sıfır (0) olarak alınmıştır. Bu sayede sadece mesafe ve kapasite kısıtlarına göre hesaplamalar yapılarak maksimum araç kapasitesinin kullanılması ve en kısa yoldan maliyetlerin azaltılması hedeflenmiştir.

Bireylerin oluşturulması (kromozomlar): Bir rotada ziyaret edilen tüm müşterilerin (çöp konteynerleri) alt güzergahları dahil olmak üzere sırayla birer birey olarak kodlanır. Örnek kodlama tipi aşağıda gösterilmiştir:

$$Alt Rota 1: 0 - 5 - 3 - 2 - 0$$

$$Alt Rota 2: 0 - 7 - 1 - 6 - 9 - 0$$

Evrimin gerçekleşmesi: Bireyler bağımsız olarak alınır ve uygunlukları belirlenir. Değerlendirilecek rota, araç başına birim mesafe bazlı maliyet ve araç başlangıç maliyeti parametrelerine göre bireyler oluşturulur ve popülasyonun evrimleştirilmesi sağlanır. Bütün araçlar homojen olarak seçildiği için başlangıç maliyetleri ve birim maliyetleri eşittir.

Uygunluk değerinin hesaplanması: Algoritmanın çalışma prensibine göre öncelikle her bir araca random olarak rotalar atanır ve her bir rotanın uygunluk değerleri belirlenir.

Uygunluk değeri her bir rotadaki toplam maliyet değerine göre belirlenmektedir.

Mesafe matrisindeki değerler ile birim maliyetler çarpılmış ve araç için belirlenen başlangıç maliyeti ile toplanarak toplam maliyet hesaplanmıştır.

$$\text{Maliyet Hesabı} = \text{Birim Maliyet} * \text{Mesafe} + \text{Başlangıç Maliyeti}$$

Uygunluk değeri toplam maliyeti minimize etmeye çalışır. Problemin ana hedefi uygunluk değerinin en yüksek değere yakın olan değerleri hesaplayarak rotaların oluşturulmasıdır. Toplam maliyet azaldıkça uygunluk değeri de artmaktadır. Uygunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\text{Uygunluk} = 1.0 / \text{Toplam Maliyet}$$

Seçim: Uygunluk değerlerine göre sıralanan rotalar genetik algoritma adımlarından seçim işlemine tabi tutulur. Uygunluk değerleri en büyük olan bireylerin seçim yöntemleri arasından literatürde de en çok kullanılan rulet tekeri yöntemi ile seçim işlemi prosesine geçilmiştir. Seçim işleminde iki parametre kullanılmıştır ve bunlar aşağıda verilmiştir:

- Individuals: Seçimin yapılacağı liste,
- k : seçilen birey sayısıdır.

Çaprazlama: GA'da seçim işleminin ardından çeşitliliğin artırılması için çaprazlama işlemi uygulanmıştır. Çaprazlama yöntemlerinden çift noktalı çaprazlama tekniği (Partially Matched Crossover) kullanılarak python programında modellenmiştir.

Mutasyon: Çaprazlama işleminin ardından bireyler çeşitliliğin artırılması için mutasyon işlemine tabii tutulmaktadır. Problem için tersine çevirmeli mutasyon yöntemi tercih edilmiştir. Mutasyon oranı P(c) ve jenerasyon değeri birçok değerde denenmiş ve sonuçları aşağıdaki bölümde verilmiştir.

4.3 Çalışma bölgesine problemin uygulanması

Algoritmada birim maliyet, mesafe, koordinat, birey sayısı, jenerasyon sayısı, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, doluluk oranı seçim parametreleri değiştirilebilmektedir. Optimum sonuca ulaşmak için algoritma üzerinde GA parametreleri değiştirilerek algoritma birçok kez çalıştırılmıştır. Birim maliyetler araştırılmış ve çöp kamyonun km başına maliyeti 10 TL olarak kabul edilmiştir(2020). Bir çöp aracında 1 şoför ve 2 toplayıcı eleman olduğu ve her birinin asgari ücret aldığı kabul

edilirse ve günlük asgari maaşın 85 TL (2021 yılı asgari günlük ücreti) olduğu düşünülerek hesaplar yapılmıştır. Bu duruma göre 255 TL başlangıç ve 10 TL km başına maliyet kabulleri ile algoritma çalıştırılmıştır. Problemden 4 durum ele alınmıştır. 1. Durumda konteynerlerin akıllı olmadıkları varsayımı ile bütün çöp noktalarının doluluk durumları incelenmeden toplamı işlemi gerçekleştirilmiştir. 2. Durumda konteyner dolulukları için koşul konulmuş olup %50 ve üzeri dolu olan konteynerlerde toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. 3. Durumda %60 ve 4. Durumda %70 ve üzeri doluluğa sahip konteynerlerden toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Durum 1: Konteynerlerin akıllı olmadıkları senaryo

Bu bölümde problemin sıradan GA ile ARP çözümünün yapılması senaryosu aktarılmıştır. GA operatörleri ve parametreleri bu durum üzerinden denenmiş ve en iyi maliyet veren değerler diğer senaryolar içinde kullanılmıştır. Tablo 7'de gösterilen popülasyon büyüklüğü ve birey sayısı birçok değer ile denenmiş ve minimum maliyetin elde edildiği birkaç senaryo üzerinden seçilmiştir.

Algoritma birçok parametre ile denenmiş ve belli bir jenerasyon sayısından sonra hep aynı maliyet değeri ve uygunluk değerini verdiği anlaşılmıştır. Araçların kapasitesi 10000 kg olduğu için bu iş için iki araç yeterli gelmektedir. Araçlardan ilki rotaya başladığında 9999 kg ile %99.9'luk doluluk oranına ikinci araç kalan bütün çöpleri toplayarak 5020 kg ile %50.2'lik dolulukla depoya dönmüştür. Toplam maliyet 3114.61 TL hesaplanmıştır.

Şekil 9'da görüldüğü üzere her iki araçta aynı anda sahaya çıkmaktadır. Birinci ve ikinci araç algoritma sonucunda belirlenen noktalara hareket etmektedir. Her iki araçta kendilerine belirlenen rotalar doğrultusunda mahalleyi dolaşmaktadır. Bu sayede mahalledeki bütün çöp toplanmış olacaktır.

4.3.2 Durum 2: Konteynerlerin akıllı olup %50 doluluk kısıtı eklenen senaryo

Bu senaryo ile çalışma bir adım ileri taşınarak akıllı çöp kutularından yararlanılmıştır. Çöplerin doluluk oranlarına göre çöp noktasına uğrama ya da uğramama kararı alacak bir kısıt parametresi eklenmiştir. Konteynerlerin doluluk oranlarının %50'nin altında olması durumunda o nokta rotadan çıkarılmıştır ve yeniden rota hesaplanmıştır.

Tablo 7. GA parametrelerinin değiştirilmesi sonucunda değişen maliyetler.

Table 7. The cost variations resulting from changing GA parameters.

Birey Sayısı	Popülasyon Büyüklüğü	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Jenerasyon Sayısı	Araç Kapasitesi (kg)	Kullanılan Araç Sayısı	Çöp Miktarı (kg)	Toplam Maliyet (km)	Uygunluk (Fitness)
337	100	0.2	0.2	100	10000	2	15026	3578.37	2.79457E-04
337	300	0.2	0.2	100	10000	2	15026	3562.33	2.80715E-04
337	500	0.2	0.2	100	10000	2	15026	3422.28	2.92203E-04
337	500	0.5	0.2	100	10000	2	15026	3315.72	3.01594E-04
337	500	0.7	0.2	100	10000	2	15026	3433.33	2.91262E-04
337	500	0.85	0.2	100	10000	2	15026	3327.21	3.00552E-04
337	500	0.85	0.3	100	10000	2	15026	3348.70	2.98623E-04
337	500	0.85	0.5	100	10000	2	15026	3335.48	2.99807E-04
337	500	0.85	0.85	100	10000	2	15026	3114.61	3.21067E-04
337	500	0.85	0.85	500	10000	2	15026	3114.61	3.21067E-04
337	500	0.85	0.85	2000	10000	2	15026	3114.61	3.21067E-04
337	2000	0.85	0.85	5000	10000	2	15026	3298.55	3.03164E-04



Şekil 9. Durum 1: 1. ve 2. aracın harita üzerindeki rotaları.

Figure 9. Scenario 1: Routes of vehicle 1 and 2 on the map.

Başlangıç olarak konteyner (60 lt) doluluk oranı yarisına ulaşmamış olan noktalara uğramaması durumunda 1. aracın doluluğu incelendiğinde 9971 kg ile %99 doluluk oranını yakaladığı görülmüştür. 2. Aracın doluluğu 3637 kg ile %50 ve fazlası dolu olan bütün çöplerin toplandığı görülmüştür. Uygunluk değeri 3.85×10^{-7} ve toplam maliyet 2463.03 TL olarak değişmiştir. Şekil 10'da araçların rotaları gösterilmiştir.



Şekil 10. Durum 2: %50 doluluk altındaki çöplerin rotaya katılmadığı 1. ve 2. araç rotaları.

Figure 10. Routes of Vehicle 1 and 2 excluding waste containers with less than 50% fill level.

4.3.3 Durum 3: Konteynerlerin akıllı olup %60 doluluk kısıtı eklenen senaryo

Bu durumda çöp konteynerlerinin %60 ve üzeri dolu olanları rotaya eklenmiştir. Çıkan ilk aracın 9946 kg ile %99 doluluk yakaladığı ve ikinci aracın 2966 kg ile geri kalan %60 üstü dolu olan çöplerin toplandığı belirlenmiştir. Toplam maliyet 2280.93 TL ve uygunluk değerinin 4.08×10^{-7} olduğu görülmüştür. Şekil 11'de araçların rotaları gösterilmiştir.



Şekil 11. Durum 3: %60 doluluk altındaki çöplerin rotaya katılmadığı 1. ve 2. araç rotaları.

Figure 11. Routes of Vehicle 1 and 2 excluding waste containers with less than 60% fill level.

4.3.4 Durum 4: Konteynerlerin akıllı olup %70 doluluk kısıtı eklenen senaryo

Bu durumda çöp konteynerlerinin %70 ve üzeri dolu olanları rotaya eklenmiştir. Çıkan ilk aracın 9971 kg ile %99 doluluk yakaladığı ve ikinci aracın 1843 kg ile geri kalan %70 üstü dolu olan çöplerin toplandığı belirlenmiştir. Toplam maliyet 2.056.04 TL ve uygunluk değerinin 4.55×10^{-7} olduğu görülmüştür. Şekil 12'de araçların rotaları gösterilmiştir.



Şekil 12. Durum 4: %70 doluluk altındaki çöplerin rotaya katılmadığı 1. ve 2. araç rotaları.

Figure 12. Routes of Vehicle 1 and 2 excluding waste containers with less than 70% fill level.

Doluluk oranlarına göre rotaların kat ettikleri mesafeler, toplam maliyetleri ve toplam süre değerleri aşağıdaki Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Doluluk oranlarına göre maliyet ve uygunluk değerlerinin kıyaslanması.

Table 8. Comparison of cost and fitness values based on fill levels.

	Çöpleri Toplanan Konteyner Doluluk Oranı	1.Araç Doluluk Oranı	2.Araç Doluluk Oranı	Toplam Maliyet	Toplam Kat Edilen Yol (km)	Süre (saat)	Uygunluk Değeri
Durum 1	%0-100	9999 kg -%99.9	5020 kg %50,2	3114.61 TL	311.44	11.39	3.01 e-07
Durum 2	%50-100	9971 kg - %99	3637 kg - %36	2463.02 TL	246.28	9.21	3.85 e-07
Durum 3	%60-100	9946 kg - %99	2966 kg - %30	2280.93 TL	228.07	8.6	4.08 e-07
Durum 4	%70-100	9971 kg - %99	1843 kg - %18	2059.04 TL	205.88	7.86	4.55 e-07

Süre hesabı yapılırken çöp kamyonunun mahalleye girişine kadarki hızı ile mahalle içerisinde elleçleme yaparken ki hızları ayrı alınmıştır. Mahalle ile katı atık bertaraf tesisi arasında yaklaşık 15 km'lik yol için hızı 50 km/sa, mahalle içerisindeki hızı için ise 30 km/sa ve her bir konteynerin elleçleme süresi ise 15 sn olarak kabul edilmiştir.

Bertaraf tesisinden mahalleye ve mahalleden bertaraf tesisine kadarki yolun süre hesabı:

$$(15 \times 2) \text{ km} = 50 \text{ km/sa} \times t_1$$

$$t_1 = 0.6 \text{ saat}$$

Mahalle içerisinde hiç durmadan geçirilen sürenin hesabı:

$$\text{Toplam kat edilen mesafe} - (15 \times 2) = 20 \times t_2$$

Konteyner elleçleme sırasında harcanan zaman:

$$\text{konteyner sayısı} \times \text{elleçleme süresi} = t_3$$

$$337 \times 15 \text{ sn} = 5055 \text{ sn}$$

$$t_3 = 1.4 \text{ saat}$$

Mahalle içerisindeki çöpün iki araç tarafından toplanması için geçen süre $t_1 + t_2 + t_3$ olarak hesaplanmıştır. Durumlar karşılaştırılmış ve Tablo 9'da yapılan kısıtlamalar ile problem sonuçlarının nasıl minimize edildikleri gösterilmiştir.

5 Sonuçlar

Bu çalışma ile araç rotalama problemlerine yeni bir bakış açısı getirilmesi amaçlanmıştır. Literatür örneklerine bakıldığında ARP çözümlerindeki müşteri olarak nitelendirilen noktaların sayılarının düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışma örneğinde müşteri olarak atanan çöp konteyner sayısı 337, oldukça büyük bir rakamdır. Ayrıca çöp konteynerlerinin akıllı hale getirilmesi ve aralarında bağlantı kurabilmeleri sayesinde (IoT) genel merkezden düzenli olarak kontrol edilmesi sağlanacaktır. Bu sayede gerekli görülen durumlarda konteynerlerin elleçleme işlemlerinin yapılması sayesinde hem maliyetlerin azaltılması hem de elleçleme sürelerinin azaltılması sayesinde tasarruf edilecektir. Ayrıca çöp toplama araçlarının kullanımlarının azaltılması ile araçların kullanım ömürlerinin arttırılması ve çalışan işçilerin çalışma saatlerinin azalması sağlanabilir. Katı atık toplama işinde çalışan personelin başlangıçta çalışma saatleri azalırken projenin büyük bir bölgeye yayılması ile çalışan işçi sayısında azalmaya gidilmesi olasıdır. Bunun yanı sıra IoT sistemlerinin her bir sensör için başlangıç maliyetleri yıllık yaklaşık olarak 250\$ olduğu piyasa araştırmasından öğrenilmiştir. Projenin başlangıcında bu oldukça büyük bir maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca katı atıklar için seviye sensörü ve yazılım ile ilgilenen firma sayısının az olması sebebiyle fiyatlar yüksek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunların teknolojinin erişilebilirliğinin artması ile maliyetlerin azalması beklenmektedir. Ayrıca projenin büyük bir alan ile çalışması durumunda başlangıç maliyetlerini amorte ederek zaman içinde kara geçmesi beklenmektedir.

Bu çalışmada görülmüştür ki öncelikle amaç maksimum kapasitede araçların çalıştırılması ile rotalama yapılmaya çalışılmıştır. Algoritmanın performansının arttırılabilmesi açısından bu çalışmanın birbirine bu kadar yakın noktalar yerine daha uzak noktalar arasında yapılması ve gerçek kullanıcı alışkanlıklarının göz önünde bulundurulması random veriler yerine gerçek veriler ile hareket edilmesi sonucunda çok daha fazla verim alınabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada tek bir mahalle ele alındığı için sefere ikinci çıkan aracın kapasitesi istenildiği gibi doldurulamamış ve boş kapasite ile depo noktasına döndüğü görülmüştür. Öneri olarak bu aşamadan sonrasında yan mahalledeki konteynerlerinde rotaya katılması ya da bölgesel olarak bölgenin ihtiyaçlarına göre belirlenen taleplerin düzenlenmesinin ardından çöp araç kapasitelerinin değiştirilerek maliyet analizlerinin yapılması mümkündür.

Bu çalışmanın ardından IoT sistemi ile mahallenin çöp alışkanlıklarının gözlemlenmesi sonucunda araç filo değişikliklerinin yapılabileceği, çöp günlerinin oluşturulabileceği ve çöp konteyner büyüklüklerinin bölgelere göre değişkenlik göstermesi gibi alternatif çözümler üretilebilir. IoT sistemi sayesinde gözlemlenebilecek olan dönemsel çöp artış ya da azalış (mevsimsel, tatil beldesi, turizm bölgesi) durumlarının gözlemlenerek toplama periyotları düzenlenebilir.

6 Conclusions

The aim of this study was to provide a new perspective on vehicle routing problems. Literature examples have shown that the number of points considered as customers in VRP solutions is typically low. However, in this study, the number of assigned waste containers as customers is 337, which is a significantly large number. Additionally, by making the waste containers smart and enabling them to communicate with each other (IoT), regular monitoring from a central headquarters will be ensured. This will allow for cost reduction and shorter handling times through manual handling of containers when necessary. Furthermore, reducing the usage of garbage collection vehicles is expected to contribute to their lifespan.

In this study, it was observed that the primary objective was to route the vehicles in operation at maximum capacity. To improve the algorithm's performance, it is believed that focusing on more distant points rather than closely located ones and using real data instead of random data, considering actual user habits, would yield more efficient results. Since only one neighborhood was considered in this study, it was observed that the vehicle on the second round was not fully utilized and returned to the depot with remaining capacity. As a suggestion, after this stage, the vehicle could incorporate containers from neighboring areas or adjust the demands based on regional needs, followed by changing the garbage truck capacities and conducting cost analyses.

Tablo 9. Senaryo sonuçları.

Table 9. Scenario results.

	Toplam Maliyet	Toplam Kat Edilen Yol	Süre
Durum 1	Maksimum maliyet durumu = 3114.61 TL	Maksimum mesafe = 311.44 km	Maksimum süre = 11.39 sa.
Durum 2	Azalan maliyet= 651.59 tl	Azalan mesafe= 65.16 km	Azalan süre= 2.18 sa.
Durum 3	Azalan maliyet= 833.68	Azalan mesafe= 83.37 km	Azalan süre=2.79 sa.
Durum 4	Azalan maliyet= 1.055.57	Azalan mesafe= 105.56 km	Azalan süre=3.53 sa.

Following this study, with the observation of the neighborhood's waste habits through the IoT system, alternative solutions can be developed. These solutions may include making changes to the vehicle fleet, creating waste collection schedules, and adjusting the size of waste containers according to specific regions. By utilizing the IoT system, the observed periodic increases or decreases in waste (seasonal, holiday destinations, tourist areas) can be monitored and collection periods can be adjusted accordingly.

7 Yazar katkı beyanı

Bu çalışma Hacer Kübra İnkaya Zengin tarafından Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yazılan "Katı Atık Lojistiği İçin Dinamik Ağda Rotalama Probleminin Optimizasyonu" isimli tezden üretilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada Hacer Kübra İnkaya Zengin veri toplama, yazılım, analiz, literatür taraması ve taslak makalenin yazım başlıklarında; Soner Haldenbilen fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, Olcay Polat fikir oluşması, yazılım, 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 Kaynaklar

- [1] TÜİK. "Belediye Atık İstatistikleri". <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Belediye-Atik-Istatistikleri-2018-30666> (27.06.2023).
- [2] TÜİK. "Belediye Atık İstatistikleri". <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr> (27.06.2023).
- [3] Akdoğan A, Güleç S. "Sürdürülebilir Katı Atık Yönetimi Ve Belediyelerde Yöneticilerin Katı Atık Yönetimiyle İlgili Tutum Ve Düşüncelerinin Analizine Yönelik Bir Araştırma". *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 39-69, 2007.
- [4] Eunomia. "Recycling-Who Really Leads the World? Identifying the World's Best Municipal Waste Recyclers". https://eeb.org/wp-content/uploads/2019/06/Recycling_who-really-leads-the-world-REPORT.pdf (27.06.2023).
- [5] İçişleri Bakanlığı. "Türkiye Mülki İdare Bölümleri Envanteri". <https://www.e-icisleri.gov.tr/Anasayfa/MulkiIdariBolumleri.aspx> (27.06.2023).
- [6] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Çevresel Göstergeler". <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/atik-duzenli-depolama-tesis-sayisi-belediye-sayisi-hizmet-verilen-nufus-i-85750> (27.06.2023).

- [7] Hoornweg D, Bhada-Tata P. "What A Waste, A Global Review of Solid Waste Management". Urban Development Series Knowledge Papers. The World Bank. Washington, USA, 40, 2012.
- [8] Hoornweg D, Bhada-Tata P. "What A Waste, A Global Review of Solid Waste Management". Urban Development Series Knowledge Papers. The World Bank. Washington, USA, 5, 2012.
- [9] Ashton K. "That "Internet of things" Thing: In the real world things matter more than ideas". *RFID Journal*, 4986(1), 97-114, 2009.
- [10] Dantzig G, Ramser JH. "The truck dispatching problem". *Management Science*, 6(1), 80-91, 1959.
- [11] Clarke G, Wrighth J. "Scheduling of vehicle routing problem from a central depot to a number of delivery points". *Operations Research*, 12(4), 568-581, 1964.
- [12] Rodrigue JP, Comtois C, Slack B. "The geography of transport systems". 3rd ed., London, United Kingdom, Routledge. 2009.
- [13] Braekers K, Ramaekers K, Van Nieuwenhuysse I. "The vehicle routing problem: State of the art classification and review". *Computers & Industrial Engineering*, 99(2016), 300-313, 2016.
- [14] Eksioğlu B, Vural AV, Reisman A. "The vehicle routing problem: A taxonomic review". *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483, 2009.
- [15] Ropke S. Heuristic and Exact Algorithms for Vehicle Routing problems. PhD Thesis, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [16] Demirtaş YE. Dinamik Araç Rotalama Problemine Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması Çözüm Önerisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [17] Konstantakopoulos GD, Gayialis SP, Kechagias EP. "Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification". *Operational Research*, 2022(22), 2033-2062, 2023.
- [18] Elshaer R, Awad H. "A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants". *Computers & Industrial Engineering*, 140(106242), 1-19, 2020.
- [19] Bräysy O, Gendreau M. "Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics". *Transportation Science*, 39(1), 119-139, 2005.
- [20] Polat O, Kalaycı CB, 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.
- [21] Polat O. "A parallel variable neighborhood search for the vehicle routing problem with divisible deliveries and

- pickups". *Computers & Operations Research*, 85, 71-86, 2017.
- [22] Holland J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Michigan, USA, University of Michigan Press, 1975.
- [23] Preux P, Talbi E. "Towards hybrid evolutionary algorithms". *International Transactions in Operations Research*, 6(6), 557-570, 1999.
- [24] Mutlu Ö, Polat O, Supciller AA. "An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II". *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426, 2013.
- [25] Nabiyev VV. *Yapay Zekâ Problemleri- Yöntemler- Algoritmalar*. 5. Baskı, Ankara, Türkiye, Seçkin Yayınevi, 2003.
- [26] Tian Y, Song J, Yao D, Hu J. "Dynamic vehicle routing problem using hybrid ant system". *Proceedings of Intelligent Transportation Systems*, 2, 970-974, 2003.
- [27] Taniguchi E, Shimamoto H. "Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(3-4), 235-250, 2004.
- [28] Fleischmann B, Gnutzmann S, Sandvoß E. "Dynamic vehicle routing based on online traffic information". *Transportation Science*, 38(4), 420-433, 2004.
- [29] Du TC, Li YE, Chou D. "Dynamic vehicle routing for online B2C delivery". *Omega*, 33(1), 30-45, 2005.
- [30] Wang W, Wu B, Zhao Y, Freng D. "Particle swarm optimization for open vehicle routing problem". *Computational Intelligence: International Conference on Intelligent Computing*, Kunming, China, 16-19 August 2006.
- [31] Khoudjia MR, Sarasola B, Alba E, Jourdan L, Talbi EG. "A comparative study between dynamic adapted PSO and VNS for the vehicle routing problem with dynamic requests". *Applied Soft Computing* 12(4), 1426-1439, 2012.
- [32] Montemanni R, Gambardella LM, Rizzoli AE, Donati AV. "Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem". *Journal of Combinatorial Optimization*, 10(4), 327-343, 2005.
- [33] Polat O, Kalayci CB, Bilgen B, Topaloğlu D. "An integrated mathematical model for the milk collection problem". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(9), 1087-1096, 2019.
- [34] Eren H. Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma (GA) ile Çözüm Performansının Arttırılmasında Deneysel Tasarımı Uygulaması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [35] Şahin Y, Karagül K. "Gezgin satıcı probleminin melez akışkan genetik algoritma (MAGA) kullanarak çözümü". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 106-114, 2019.
- [36] Şahin Y. "Sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin gezgin satıcı problemi çözüm performanslarının Kıyaslanması". *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 19(4), 911-932, 2019.
- [37] Pulat HF, Aksoy YY. "Türkiye kentsel katı atık kompozisyonunun kayma mukavemeti özellikleri ve çevre duraylılığının incelenmesi". *İMO Teknik Dergisi*, 28(1), 7703-7724, 2017.
- [38] Solomon M. "VRPTW Benchmark Problems". <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm> (27.06.2023).
- [39] Hasle G, Lie KA, Quak E. *Geometric Modelling, Numerical Simulation and Optimization*. 1st ed., Heidelberg, Germany, Springer, 2007.