

Araç Rotalama Problemleri ile Çözüm Yöntemlerinin Sınıflandırılması ve Bir Uygulama

Doç. Dr. Timur KESKİNTÜRK

*İstanbul Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Sayısal Yöntemler ABD
tkturk@istanbul.edu.tr*

Nihan TOPUK

*Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü
nihantopuk@gmail.com*

Okan ÖZYEŞİL

*Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü
oozyesil@yahoo.com*

Araç Rotalama
Problemleri ile
Çözüm
Yöntemlerinin
Sınıflandırılması
ve Bir Uygulama

77

Özet

Bu çalışmada, araç rotalama problemleri (ARP) ve çözüm yöntemlerinin sınıflandırılması ele alınmıştır. Literatürde yayımlanan, kapasite ve mesafe kısıtlı, zaman pencere, ayrı teslimatlı, geri toplamalı, periyodik teslimatlı, ve topla ve dağıt olarak kategorize edilen araç rotalama problemleri çeşitleri ve problem türlerine göre çözüm yöntemleri raporlanmıştır. Çözüm yöntemleri kesin, klasik sezgisel ve meta sezgiseller olarak üç grupta ele alınmıştır. Yerel literatür incelendiğinde, konu ile ilgili bir sınıflandırma çalışması ile karşılaşılmadığından bu konuda çalışan araştırmacılar için de bir kaynak olabileceği düşünülmüştür. Çalışmanın sonunda kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin iki sezgiselle çözümü ile ilgili bir uygulamaya yer verilmiş ve çözüm yöntemlerinin bir analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Araç Rotalama Problemi, Sezgisel, Meta sezgisel, Periyodik, Zaman Penceresi, Kapasite Kısıtlı.

CLASSIFICATION OF VEHICLE ROUTING PROBLEMS AND SOLVING TECHNIQUES AND AN IMPLEMENTATION

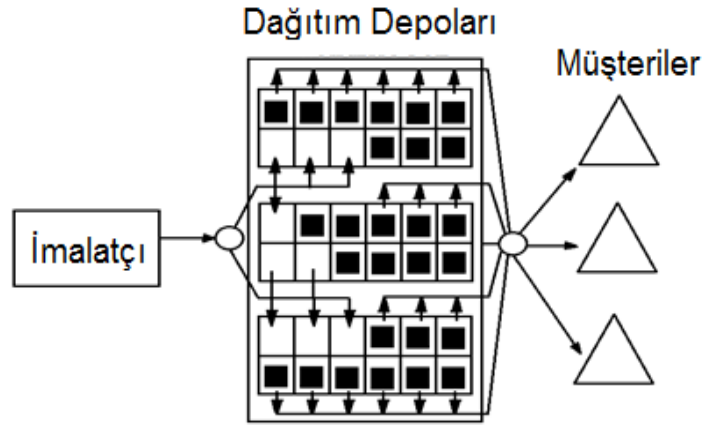
Abstract

This study presents the classification of vehicle routing problems and solving techniques. It reports variants of the vehicle routing problems which are categorized as capacity-distance constrained, time windows, split deliveries, backhauls, periodic deliveries, pick-drop deliveries and solving techniques about these variants which have been issued in literature. Solving techniques have been classified in three groups: exact, classical heuristics and metaheuristics. When the Turkish literature is viewed, due to the absence of a classification study about the topic, it is considered as a source for the researchers on it. In the end, an implementation for solving a capacity-constrained vehicle routing problem with two heuristics and an analysis

about solving techniques have presented.
Keywords: Vehicle Routing Problem, Heuristic, Meta Heuristic, Periodic, Time Window, Capacity Constrained.

I. Giriş

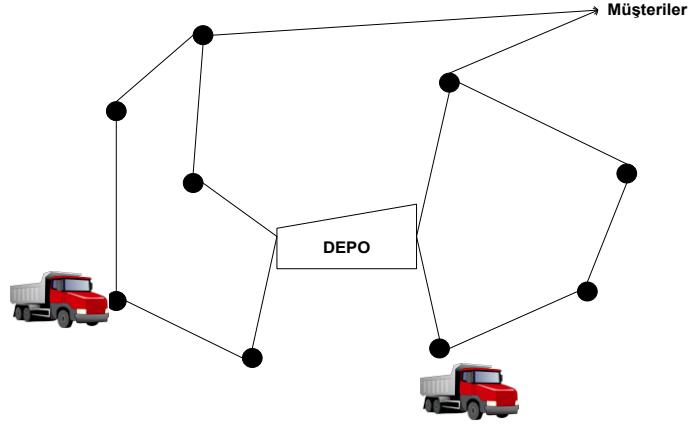
Araç rotalama, lojistik sisteminde bir veya birkaç depodan belirli müşterilere ürün dağıtımı ve müşterilerden ürün toplanması olarak tanımlanabilmektedir. Çok aşamalı bir lojistik sistemine bakıldığında, araç rotalama problemi, ürünleri depoya sevk eden üretici bir firma, siparişlerin toplanıp müşterilere sevk edildiği depo ve ürünleri talep eden müşteri bileşenlerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla tüm bunlar düşünüldüğünde ürün toplama veya dağıtımının oldukça maliyetli ve yoğun iş gücü gerektiren bir faaliyet olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 1: Çok aşamalı Lojistik Sistemi Bileşenleri

Dağıtım aşaması, üretici firmadan alınan ürünlerin müşterilere teslim edilmesinden oluşmaktadır. Bu aşamada her bir araç rotasına depodan başlamaktadır ve her bir müşterinin talebi kadar ürün dağıtımını gerçekleştirdikten sonra tekrar depoya geri dönmektedir. Dolayısıyla depo, araçların rotasına başlayıp, geri döndüğü yer olarak tanımlanabilmektedir. Araç rotalama problemi, depo sayısına göre tek depolu veya çok depolu olarak ikiye ayrılmaktadır.

Araç Rotalama Problemi ilk olarak "Dantzig ve Ramser" tarafından 1959 yılında literatüre kazandırılmıştır (Dantzig ve Ramser, 1959). Bu çalışmada, benzin istasyonlarına benzin dağıtımı üzerinde durulmuştur. Kendi deposundan hareket eden ve yine bir depoya dönen, müşterilerin ihtiyaçlarını belirlenen kısıtlar altında karşılayan ve taşıma maliyetlerinin veya kat edilen yolun her bir araç için minimize edildiği rotalar kümesi belirlenmiştir. Aşağıda, tek depolu dağıtım için araç rotalama problemine ait gösterim verilmektedir.



Şekil 2: Araç Rotalama Problemi

Dantzig ve Ramser'in çalışmalarından sonra Araç rotalama probleminin çeşitleri üzerinde çalışılmıştır(Cordeau ve diğerleri, 2005, Juanve diğerleri, 2009, Castro ve Torres, 2011, Torres ve diğerleri, 2009; Ozfirat ve diğerleri, 2001).

Literatürde, araç rotalama problemi Gezgin Satıcı Probleminin (GSP) birden fazla araç ve eklenmiş kısıtlar ile geliştirilmiş hali olarak bilinmektedir. Gezgin Satıcı probleminde,

- Satıcı, mallarını n şehirde satmak istiyor,
- Satıcı n şehri en kısa şekilde ve her bir şehre bir kere uğrayarak turu tamamlamak istiyor,
- Şehir sayısı arttıkça problemin zorluğu artar.
- Problemin amacı, en kısa yolunu satıcıya sunabilmektir. Basit bir şekilde tanımlanacak olursa, n şehirli simetrik bir problemde mümkün turların sayısı, $n!/2$ 'dir. Asimetrik olduğunda ise $n!$ olmaktadır.

Yerel literatür incelendiğinde ARP problemleri ve çözüm yöntemleri ile ilgili bir sınıflandırma çalışmasının olmadığı görülmüştür. Bu noktadan hareketle amaçlanan, bu konuda çalışmakta olan ve çalışacak araştırmacılara bu konuda ışık tutabilmektir. Çalışmanın kalan bölümündeki kısımlar şu şekilde organize edilmiştir: 2. bölümde ARP'nin uygulama alanlarından bahsedildikten sonra ARP çeşitleri ve problemlere ait matematiksel modeller tanıtılmıştır.4.bölümde farklı ARP problemlerinin çözüm yöntemleri ele alınmıştır. 5. bölümde bir ARP uygulamasına yer verilerek çalışma sonuçlarının tartışıldığı Sonuç bölümüyle sonlandırılmıştır.

II. Arp Uygulama Alanları

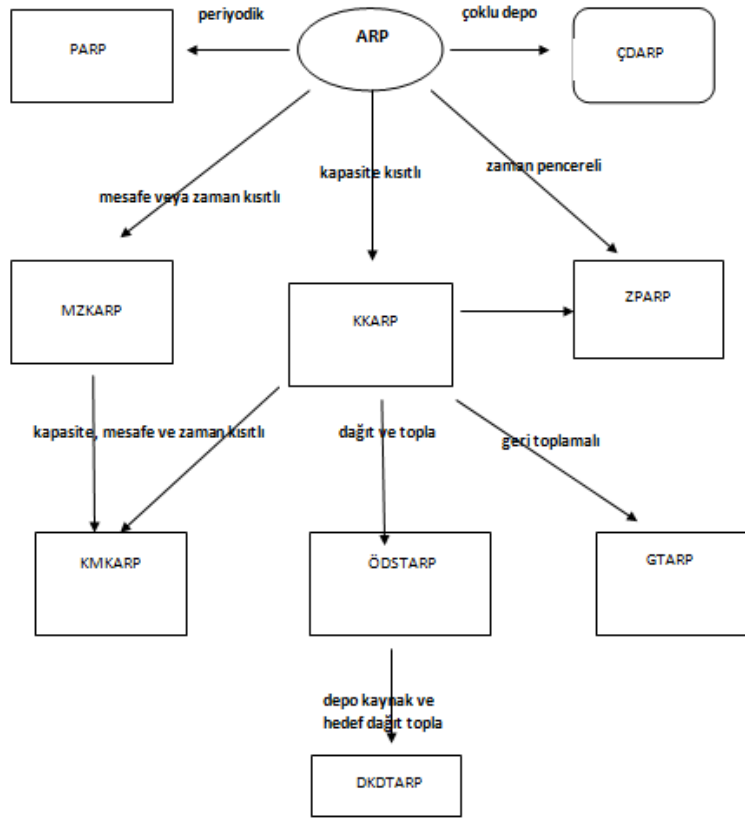
Yapılan literatür araştırmasına göre, araç rotalama probleminin en çok uygulandığı alanlar sırasıyla,

1. Atık toplama,
2. Ürünlerin bir veya daha fazla depodan farklı müşteri noktalarına dağıtımı (ulaşım ve lojistik sektöründeki uygulamalar)
3. Dağıtım ve toplama problemleri,
4. Okul taşıt güzergâhlarının belirlenmesi,
5. Uçak rotalama problemleri,
6. İnternet üzerinden yapılan alışverişlerin teslimatı,
7. Gazete, posta, ekmek, içecek vs. dağıtımı,
8. Devriye araçlarının rotalanması,
9. Stok alanındaki malzeme toplama problemleri
10. Engelli insanların taşınması,
11. Servis araçlarının rotalanması
12. Malzeme akış sistemi tasarımıdır (Orhan ve diğerleri, 2010; Flood, 1955; Dantzig ve diğerleri, 1957; Irnish, 2008; Demiral, 2008).

Atık toplama uygulamasında amaç farklı sağlık sektörü yada evsel atıkların toplama merkezlerinden atık arıtma merkezlerine taşınması ile ilgili kullanılacak araçların sayısı ve rotası ile ilgili çözümler aramaktır. Ulaşım ve lojistik uygulamalarında ise fabrikalardan depolara, depolardan müşterilere dağıtım yapan taşıma araçlarının rotalarının belirlenmesini sağlamaktır. Ulaşım sektöründe ise özellikle kamuda kullanılan toplu taşıma araçlarının rotalarının belirlenmesi sağlanmaktadır. Buna benzer olarak okul servislerinin rotalarının ve aynı rota üzerinde hangi yerleşim merkezlerinin seçilmesi gerektiği ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Uçak rotalama problemlerinde ise uçuş noktalarına hangi sıklıkla uçuş hizmeti verilmesi ve bu sıklığı karşılamak için uçuşların planlamasının nasıl olması gerektiği ile ilgili çözümler aranmaktadır.

III. Araç Rotalama Problemi Çeşitleri

Araç rotalama problemleri, tedarik zincirinin son aşaması olan ürün dağıtımı sırasında ortaya çıkan optimizasyon problemleri olarak ifade edilmektedir. En iyi çözümü elde etmek amacıyla ele alınan yaklaşım ise, problem çeşitlerine uygun kısıtların oluşturulmasıdır. ARP' de ele alınan problem çeşitleri şekil 3'de gösterilmektedir (Kumar, 2012).



Şekil 3: Araç Rotalama Problemi Çeşitleri (Weise ve diğerleri, 2010).

A. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP)

Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminde her aracın belirli bir kapasitesi vardır ve bu araçların kapasiteleri birbirine eşittir. Müşterilerin talepleri de araç kapasiteleri gibi önceden bellidir. Araçlar hareketine depodan başlar ve tekrar depoya dönerek rotalarını sonlandırırlar. Teslimatlar ise müşterilere tek seferde gönderilir. Bu problem tipinde amaç, talepleri bilinen müşterilerin sevkiyatı için katedilen toplam mesafenin minimize edilmesidir (Yazgan ve diğerleri, 2010).

Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi, genellikle N tane müşterinin taleplerini (d) karşılayacak K tane araç ile ifade edilmektedir. Müşterilerin taleplerini karşılayacak K tane araç vardır ve her bir aracın ziyaret edeceği müşterilerin talepleri toplamı araç kapasitesini (C) aşmamalıdır. Bu problem tipinde asıl dikkat edilmesi gereken nokta, tüm araçların hareketine depodan başlaması ve araçların depoya geri dönmesidir. Problemin amaç fonksiyonu ve kısıtlara ait matematiksel model aşağıdaki gibidir (Oropeza ve diğerleri, 2012).

Araç Rotalama
Problemleri ile
Çözüm
Yöntemlerinin
Sınıflandırılması
ve Bir
Uygulama

82

Notasyonlar N :müşteri sayısı K :araç sayısı C :araç kapasitesi c_{ij} : müşteri i den müşteri j ye gidene kadar geçen seyahat süresi**Karar değişkenleri** x_{ijk} : k aracı i den j ye gidiyorsa 1, aksi halde 0;**Matematiksel Model****Amaç fonksiyonu**

$$\min z = \sum_{k \in K} \sum_{ij \in A} c_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+ i} X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in (0)} X_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Delta^- j=0} X_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+ j} X_{ij} = 0 \quad \forall k \in K, i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(n+1)}^{i \in \Delta^-(j)} X_{i,n+1,k} = 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N}^{i \in \Delta^-(n+1)} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} \leq C, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in (0,1) \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (8)$$

Denklem (1)'de gösterilen amaç fonksiyonu kat edilen toplam mesafeyi en küçüklemektedir. Denklem (2)'deki kısıta göre her müşteri yalnızca bir araç tarafından ziyaret edilmelidir. Denklem (3)'deki kısıta göre başlangıç deposundan gönderilen her araç yalnızca 1 müşteriye gönderilir. Denklem (4)'deki kısıta göre, bir araç bir müşteriyi ziyaret ediyorsa aynı zamanda o müşteriden hareket etmelidir. Denklem

(5)'deki kısıta göre, rotaların sonunda sadece bir düğümün depoya bağlandığı gösterilmektedir. Denklem (6)'daki kısıtta, müşterilerin taleplerinin araç kapasitesini aşamayacağı gösterilir. Denklem (7)'deki kısıta göre, değişkenlerin negatif olmama şartı sağlanmalıdır. Denklem (8)'deki kısıtta, 0-1 ikili tamsayı değişkenleri tanımlanmaktadır.

B. Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (MKARP)

Mesafe kısıtlı Araç Rotalama Probleminde, belirlenmiş olan rotalara atanan her aracın gidebileceği maksimum mesafe kısıtı bulunmaktadır. Bu kısıt ancak ve ancak araçların sürekli olarak belirli bir süreden fazla yolculuk yapmaması veya herhangi bir aksalıktan dolayı gecikmemesi durumunda eklenmelidir (Oropeza ve diğerleri,2012).

T : araçların kat edebileceği maksimum mesafe kısıtı olmak üzere,

$$\sum_{i=0} \sum_{j=0} c_{ijk} X_{ijk} \leq T \quad (9)$$

Denklem (9) aracın gidebileceği maksimum mesafeyi göstermektedir.

Bazı problem tiplerinde rota süresi ve araç sayısı sınırlı olabilmektedir. Araç sayısı sınırlı, her rotaya uğramak zorunlu ise ve araç sayısını arttırmak imkânsızsa maksimum mesafe (rota) süresi aşılacak zorunda kalınabilir. Böyle bir durumla karşı karşıya kalındığında ise aşılacak her birim süreye ceza maliyeti atanarak, toplam ceza maliyetini minimize etme yoluna gidilmelidir (Erol, 2006).

C. Çok Depolu Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÇDÖDSTARP)

Önce dağıt sonra topla araç rotalama probleminin geliştirilmiş halidir. Tek depo yerine birden fazla depo bulunmaktadır. Her depoda sınırlı sayıda araç vardır ve her araç hareketine başladığı depoya geri dönmelidir. Her müşteri sadece bir araç tarafından bir defa ziyaret edilmelidir. Tüm araçlar homojendir. Amaç, tüm araç sayısı ve kat edilen mesafeye ilişkin maliyetlerin toplamını minimize edecek şekilde optimal rotalara karar vermektir (Jian ve diğerleri, 2015; Sombuntham, 2010). İlave olarak aşağıdaki kısıt eklenmelidir.

$$\sum_{j \in A} k_{ij} = \sum_{j \in A} k_{ji} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

Denklem (10)'daki kısıta göre, her aracın hareketine başladığı noktaya geri dönmesi gerektiği gösterilmektedir.

D. Eş Zamanlı ve Karışık Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (KTDARP)

Eş zamanlı problem tipinin adından da anlaşıldığı gibi toplama ve dağıtma işlemleri aynı zamanda gerçekleşmektedir. Bir müşteriye ürün teslimatı yapılırken aynı müşteriden ürün toplanılmasına da izin verilmektedir. Gıda sektöründe, içecek endüstrisinde boş şişelerin taşınması, bu tip ARP'ye örnek olarak verilebilir (Altıparmak ve diğerleri, 2008; Dethloff, 2001).

Karışık Topla-Dağıt Araç rotalama probleminin eş zamanlı problem tipinden farkı ise, toplama veya dağıtma işlemi yapılacak müşterilerin karışık sırada ziyaret edilmesidir. Zaman penceresi eklendiğinde ise araçların dağıtım ve toplama noktalarına tanımlanan zaman dilimleri arasında varması beklenmektedir (Avcı ve diğerleri, 2012; Mitrovic-Minic, 2006).

E. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÖDSTARP)

Bu problem çeşidinde, iki farklı müşteri kümesi vardır. Birinci kümeyi ürün toplanılacak ikinci kümeyi ise ürün teslim alınacak müşteriler oluşturmaktadır. Hat doğrultusundaki (Linehaul) müşteriler, ürün teslim edilecek müşteri kümesini, geri toplama rotasındaki (backhaul) müşteriler ise ürün toplanılacak müşteri kümesini temsil etmektedirler. Bir imalat sektörü düşünüldüğünde, hammadde ve parça tedarikçileri backhaul müşterilere fabrikalar ise linehaul müşteri grubuna örnek olarak verilebilir.

Bu ARP çeşidinde genel problem, linehaul ve backhaul müşterilerine minimum maliyetle uğrayabilecek araç rotalarının belirlenmesidir. Rotalar belirlenirken, depodan hareket etmeden önce araca yüklenecek ürün miktarı aynı zamanda da müşterilerden teslim alınacak ürünlerin toplam miktarının, araç kapasitesini aşmamasına dikkat edilmelidir. Eğer belirlenen rotada her iki müşteri tipinden de bulunuyorsa, toplama yapılacak müşteriler dağıtım yapılacak müşterilere uğradıktan sonra ziyaret edilmelidir. Yapılan uygulamalara bakıldığında, araç sayısı, toplam kat edilen mesafe maliyeti ve ürün toplanılmayan müşteri sayısı minimize edilmek istenildiğinden bu problem, çok amaçlı problem çeşidi olarak tanımlanmaktadır (Duhamel ve diğerleri, 1997).

Klasik kapasite kısıtlı araç rotalama ve mesafe kısıtlı araç rotalama problemlerinin matematiksel modeline ek olarak eklenen kısıtlar aşağıdaki gibi gösterilmektedir (Öztürk ve diğerleri, 2013).

Notasyonlar

M : ürün teslim edilecek müşteri sayısı

N : ürün toplanılacak müşteri sayısı

K : araç sayısı

d_{ij} : i den j ye olan uzaklık

a_i : ürün teslim edilecek müşterinin talebi ($i=2, \dots, M+1$)

b_i : ürün toplanılacak müşterinin talebi ($i=M+2, \dots, M+N+1$)

cap_k : aracın kapasitesi ($k=1, \dots, K$)

p_i : i . müşterinin servis süresi ($i=1, \dots, M+N+1$)

e_i : i . müşterisine erken varış süresi ($i=1, \dots, M+N+1$)

t_i : i müşterisine geç varış süresi ($i=1, \dots, M+N+1$)
 t : servise başlama süresi
 c_{ij} : müşteri i den müşteri j ye gidene kadar geçen seyahat süresi
 T : araçların kat edebileceği maksimum mesafe kısıtı
 MM : ceza katsayısı
 S : alt turların oluşmasını engelleyen kısıt

Ek Karar değişkenleri

x_{ijk} : k aracı i den j ye gidiyorsa 1, aksi halde 0;
 u_{ik} : eğer k aracı i linehaul müşterisine hizmet ediyorsa 1, aksi halde 0
 v_{ik} : eğer k aracı i backhaul müşterisine hizmet ediyorsa 1, aksi halde 0

Ek Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^K u_{ik} = 1 \quad (i = 2, \dots, M + 1) \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{ik} = 1 \quad (i = M + 2, \dots, M + N + 1) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{M+1} x_{ijk} = u_{jk} \quad (j = 2, \dots, M + 1; k = 1, \dots, K) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{M+N+1} x_{ijk} = v_{jk} \quad (j = M + 2, \dots, M + N + 1; k = 1, \dots, K) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{M+N+1} x_{ijk} = u_{ik} \quad (i = 2, \dots, M + 1; k = 1, \dots, K) \quad (15)$$

$$\sum_{j \in [2, M+1]}^{M+N+1} x_{ijk} = v_{ik} \quad (i = M+2, \dots, M+N+1; k = 1, \dots, K) \quad (16)$$

$$p_1 + c_{1j} - t_j \leq MMx(1 - x_{1jk}) \quad (j = 2, \dots, M+N+1; k = 1, \dots, K) \quad (17)$$

$$t_i + p_i + c_{il} - T \leq MMx(1 - x_{ilk}) \quad (i = 2, \dots, M+N+1; k = 1, \dots, K) \quad (18)$$

$$t_i + p_i + c_{ij} - t_j \leq MMx(1 - x_{ijk}) \quad (i, j = 2, \dots, M+N+1; k = 1, \dots, K) \quad (19)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad (i = 1, \dots, M+N+1) \quad (20)$$

Denklem (11) ve (12)'deki kısıtlar, bir araç tarafından ziyaret edilen müşterilere ait dağıtım ve toplamanın aynı araç tarafından yapılması gerektiğini göstermektedir. Denklem (13)'deki kısıta göre, eğer j müşterisi linehaul (ürün teslim edilecek) müşterisi ise, i müşterisinin linehaul veya backhaul olabileceğini gösteren kısıttır. Denklem (14)'deki kısıta göre, eğer j müşterisi backhaul (ürün toplanılacak) müşterisi ise, i müşterisinin kesinlikle backhaul müşterisi olması gerektiğini gösteren kısıttır. Denklem (15) ve (16)'daki kısıtlar, (13) ve (14) numaralı denklemlerin tamamlayıcı kısıtlarıdır. Denklem (17-20)'deki kısıtlar, her müşterinin belirlenen zaman kısıtı içerisinde hizmet görmesi gerektiğini ve alt turların önlenmesi gerektiğini ifade etmektedir.

E. Ayrık Yüklemeli ve Zaman Pencereci ARP (ZARP)

Bu araç rotalama problemi, zaman pencereci araç rotalama probleminin bir türevi olarak ele alınmaktadır. Bu konuda çok fazla çalışma olmamakla beraber son dönemlerde araç rotalama için ayrık zamanlara göre karar vermenin önemi üzerinde durulan bir kaç çalışma bulunmaktadır (McNabb ve diğerleri, 2015). Bu problemde müşterilere ayrılmış zaman dilimlerinde dağıtım yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Ayrılmış zaman dilimleri sayısı arttıkça teslimat sayıları artmakta bunun yanında zaman kısıtı üzerinde oluşan baskı da artmaktadır (McNabb ve diğerleri, 2015; Langevin, 1989).

F. Geri Toplamalı ARP (GTARP)

İade durumu gerektiren ürünlere uygulanan araç rotalama problemleridir. Ambalaj, depozito, otomotiv sektöründe yedek parçaların geri dönüşüm için fabrikalara geri gönderilmesi gibi işlemler bu araç rotalama problemine örnek verilebilmektedir. Bu problem tipinde, müşterilerden iade gelebilecek ürünler göz önünde bulundurularak araç kapasiteleri hesaplanmaktadır (Wright ve diğerleri, 1964).

G. Periyodik ARP (PARP)

Periyodik araç rotalama problemi, rekabetçi ortam koşullarında müşterilerine diğer dağıtıcılardan önce ulaşarak satış miktarlarını etkilemeyi ele alan ARP çeşididir. Eğer ürünler rakiplerinden daha geç vakitte müşterilere ulaşırsa bu kısmi satış kaybına neden olacaktır. Bu nedenle dağıtım şirketleri rotalarını, diğer rekabetçi şirketlerin stratejilerine bağlı olarak oluşturmaktadır. Bu tarz rekabet, kısa raf ömrü olan ürünlerin dağıtım probleminde ortaya çıkmaktadır. Taşınan ürünün uzun süre taşıma nedeniyle bozulmaması için özel cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu problemde asıl amaç, toplam mesafeyi minimize etmekle birlikte, müşterilere yapılacak olan dağıtım miktarını (satış) maksimize etmektir (Norouzi ve diğerleri, 2015).

IV. Arp Çözüm Yöntemleri

Araç Rotalama Problemlerinin çözümü için birçok metot geliştirilmiştir. Bu yöntemleri kesin, klasik sezgiseller ve meta sezgiseller olarak 3 gruba ayırmak mümkündür. Kesin çözüm yöntemleri ile optimal çözüm garanti edilirken, diğer yöntemler ile optimuma yakın çözümler çok daha kısa sürede bulunabilir. GSP için geliştirilen çözüm yöntemleri, iki aşamalı sezgisellerin rotalama aşamasında kullanılabilir.

A.Kesin Çözüm Yöntemleri

ARP için kesin çözüm yöntemleri, GSP yöntemlerinin geliştirilmesi ile oluşturulmuştur (Düzakın ve Demircioğlu, 2009). Kesin çözüm yöntemleri, en iyi çözümü bulmayı garanti eder. Fakat çözüm süresi problemin boyutuna bağlı olarak üstel olarak artar. Genelde küçük ve orta boyutlu problemler pratik ve ispatlanabilir bir biçimde çözülebilmektedir. Bütün araç rotalama problemlerini başarıyla çözen kesin çözüm yöntemi yoktur (Ropke, 2005; Kumar, 2012).

Kesme Düzlemi

Kesme düzlemi algoritmasında temel fikir, doğrusal programlama ile oluşturulmuş olan uygun çözüm bölgesindeki bazı parçaların kesip atılarak, tam sayılı optimal çözüme simpleks metot ile ulaşmaktır (Pan, 2015). Başka bir deyişle tam sayılılığı sağlamak için kısıtlar eklenir. Kısıtlar eklendiğinde bulunan yeni çözüm tam sayılı ise optimal çözüme ulaşılmıştır. Hala kesirli ise tam sayılı çözüm bulana kadar kısıt eklemeye ve yeniden çözmeye devam edilir (Toth ve Vigo, 2002).

Dal ve Sınır Algoritması

Dal ve sınır algoritmasında (Balas ve Toth, 1983), gezgin satıcı problemi, alt tur (depoda başlayıp bitmeyen turlar) engelleyici kısıtları yok edilerek atama problemi haline dönüştürülür ve Macar Yöntemi ile çözüme başlanır. Satır ve sütun eleme yöntemiyle rotalar belirlenmeye çalışılır. Alt tur oluşursa; en kısa döngüyü engelleyecek kısıtlar ile dallandırılır. İstenilmeyen rotalara atama yapılmaması için maliyet matrisinde ceza katsayısı olarak büyük M sayısı atandıktan sonra matris tekrar baştan çözümlenerek tüm dallar için aday çözümler belirlenir. Tüm dallar için aynı iterasyonlar tekrarlandıktan sonra en iyi çözüme karar verilir.

Dal ve Kesme Algoritması

Dal-Kesme yöntemi, dal-sınır ve kesme düzlemi yöntemlerinin bir birleşimidir (Araque ve diğerleri, 1994). Araç Rotalama Problemlerinin çözümü için ilk önce problemin doğrusal programlama ile çözümü yapılır. Bu aşamada amaç fonksiyonu ve kısıtlar yazılarak model oluşturulur. Modelin çözümünde oluşabilecek olan alt turlar sıfıra eşitlenerek problem dallara ayrılır. Daha sonraki dallarda ise araç sayısı gibi kısıtları sağlayabilmek için modele alt tur engelleme kısıtlayıcısı eklenerek optimum sonuca ulaşılmaya çalışılır (Başkaya ve Öztürk, 2005).

Dinamik Programlama

Dinamik programlamada problem birbirinden bağımsız alt problemlere ayrılır. Bu alt problemlerin çözümleri saklanır ve ihtiyaç olduğu zaman bu çözümler kullanılarak araç rotalama probleminde çözüme ulaşırlar (Chauhan ve diğerleri, 2012).

B.Klasik Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Araç rotalama problemleri için en iyi çözüm, üretilecek olası rota kombinasyonlarından birisidir. Eğer tüm kombinasyonlar denenebilirse, en iyi çözüme ulaşmak mümkündür. Fakat büyük boyutlu problemlerin tüm kombinasyonlarının denemesi ve optimal çözümün bulunması zaman açısından pratik değildir. Çözümlere ulaşmak için çok fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle sonuçlara kabul edilebilir çözümler ile daha hızlı ulaşılması ihtiyacından dolayı sezgisel yöntemler geliştirilmiştir (Cordeau, ve diğerleri, 2002; Bozyer ve diğerleri, 2014). Klasik sezgiseller tur kurucu, tur geliştirici ve iki aşamalı yöntemler olarak 3 gruba ayrılabilir:

Tur Kurucu Sezgiseller

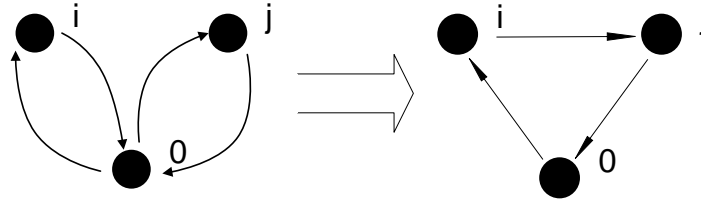
Tur kurucu sezgiseller, mümkün olmayan (infeasible) atamalarla çözüme başlar, her defasında iki düğüm arasına bir kenar ekleyerek mümkün çözüme ulaşırlar. Kenar eklenirken araç kapasite kısıtına uyulup uyulmadığı kontrol edilir. Eklencek dal, bazı maliyet tasarruflarına göre seçilir (Eryavuz ve Gencer, 2001). Genel olarak 1959-1990 yılları arasında geliştirilmişlerdir.

Dantzig ve Ramser'in Yöntemi

Araç Rotalama Problemi ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında literatüre kazandırılmıştır. Dantzig ve Ramser bu çalışmalarında benzin istasyonlarına benzin dağıtımını üzerinde durmuş ve problemin optimal çözümü için ilk kez doğrusal matematiksel modeli kurarak algoritmik bir yaklaşım ortaya koymuşlardır (Atmaca, 2012). Modelde bir depodan hareket eden ve yine aynı depoya dönen, müşterilerin ihtiyaçlarını belirlenen kısıtlar altında karşılayan ve taşıma maliyetlerinin veya kat edilen yolun her bir araç için minimize edildiği rotalar kümesi belirlenmiştir. Önerilen algoritmaya göre, herhangi iki noktanın toplam talebi araç kapasitesinin yarısını aşıyorsa bu iki noktanın bağlanamayacağı kabul edilmektedir (Dantzig ve Ramser, 1959).

Clarke ve Wright Tasarruf Algoritması

Clarke ve Wright (1964) tarafından Dantzig ve Ramser'in çalışmasından esinlenerek geliştirilmiştir. Tur kurucu sezgiseller arasında en çok tercih edilenidir. Herhangi iki nokta birbirine bağlanmadığında, depodan çıkan araç, noktaların her birine gidip gelecektir. Noktalar birbirine bağlandığında ise araç, sırasıyla birinci ve ikinci noktaya gidecek ve depoya geri dönecektir. Böylece iki noktanın bağlanması ve bağlanmaması arasındaki farka göre bir tasarruf oluşur. Tasarrufun oluşması Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4: Tasarrufun oluşması

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$$

Bu tasarruflar tüm nokta çiftleri için hesaplanarak büyükten küçüğe doğru sıralanır ve tasarrufu yüksek olanlar kapasiteyi aşmadan birbirine ve depoya bağlanmaya çalışılır.

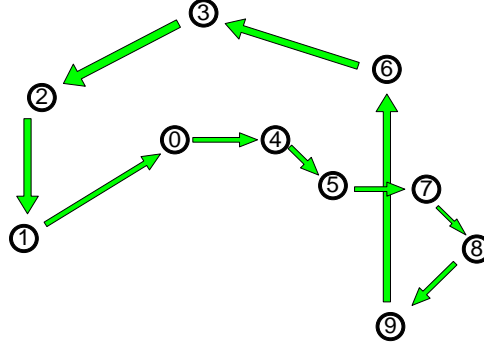
Seri tasarruf algoritmasında aynı anda iki rota oluşmasına izin verilmez. Kapasitenin tamamı kullanılıncaya kadar uygun kenarlar rotaya eklenir. Kapasite aşırsa yeni bir rota açılır ve bağlanmamış kenarlar yeni rotaya eklenmek üzere incelenir. Paralel tasarruf algoritmasında ise sıralamaya göre, eklenemeyen kenarlar için yeni rota açılabilir. Paralel tasarruf algoritması genellikle daha iyi sonuç vermekle birlikte, ikisi de hesaplanıp en iyi sonucu veren bulunmalıdır (Lysgaard, 1997).

Tasarruf Algoritması Gaskell (1967) ve Yellow (1970) tarafından modifiye edilerek geliştirilmiştir. Gaskell ve Yellow tasarruf formunu daha etkin rotalar üretebilmek için λ pozitif bir parametre olmak üzere; $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - \lambda * C_{ij}$ olarak

genelleştirmişlerdir (Cordeau ve diğerleri, 2002). Burada λ değeri büyüdükçe iki noktanın depoya olan uzaklıklarından ziyade, birbirleri arasındaki uzaklık dikkate alınmış olur (Rand, 2009).

En Yakın Komşu (EYK)

Bellmore and Nemhauser (1966) tarafından geliştirilmiştir. Gezgin Satıcı Probleminin çözümü için geliştirilen oldukça basit bir algoritmadır. İlk adımda başlangıç noktasından en yakın noktaya hareket edilir. Sonraki adımlarda ise bir sonraki en yakın noktaya hareket edilerek en son başlangıç noktasına dönülür. En yakın komşu algoritmasının bir örneği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: En yakın komşu algoritması

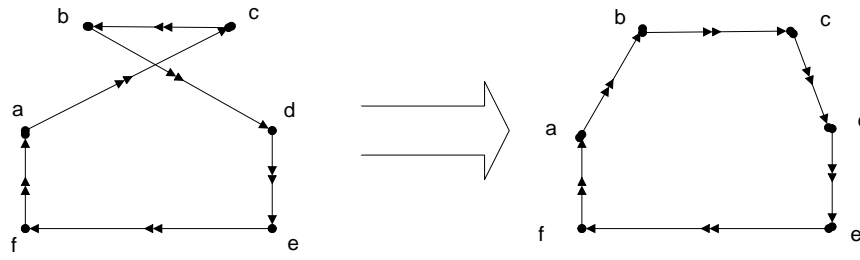
Araç rotalama problemlerine uyarlandığında ise, en yakın komşunun rotaya eklenmesi uygun olduğu müddetçe yani kapasite ya da zaman penceresi gibi kısıtları ihlal etmediği müddetçe gerçekleşir. Kısıt ihlal edilmeden eklenecek nokta bulunamazsa depoya dönülür ve yeni bir rota başlatılır (Solomon, 1987).

Tur Geliştirici Sezgiseller

Tur geliştirici sezgiseller basit bir tur kurucu sezgiselle oluşturulan bir çözümü başlangıç çözümü olarak alır ve söz konusu çözümü geliştirirler. Her bir tekrarda rota kombinasyonları değiştirilir ve değişimin daha iyi bir çözüme ulaştırıp ulaştırmadığı kontrol edilir (Eryavuz ve Gencer, 2001; Nilsson, 2003).

2-Opt Algoritması

İlk olarak Croes (1958) tarafından geliştirilmiştir. Muhtemel çözüm olarak herhangi bir uygun çözüm alınabileceği gibi basit sezgisellerle başlangıç çözümünün bulunması da uygulanabilir. Yazılacak olan algoritma ile ilk önce muhtemel çözüm üzerinden iki nokta çifti seçilir (a-c, b-d). Sonraki aşamada turu bozmayacak şekilde iki nokta yer değiştirir (a-b,c-d). Noktaların değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.



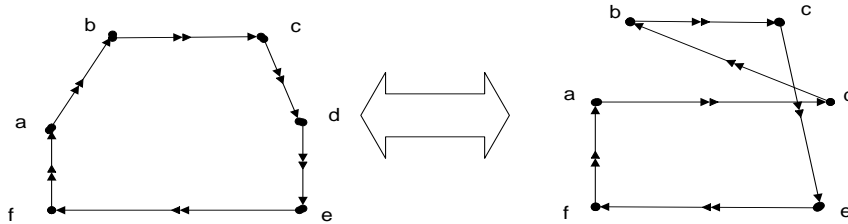
Şekil 6: 2-opt gösterimi

Yeni oluşan çözüm bir öncekine göre iyileşme sağlamışsa kabul edilir. Aksi halde bir önceki çözümle devam edilir. Bu şekilde yeni rota üzerinde sadece iki noktanın yeri değişir ve rotadaki diğer noktalar sabit kalır. İkili değişimle artık daha iyi sonuç bulunamayana kadar bu şekilde devam edilir ve tüm kombinasyonlar denir. 2-opt algoritması ile optimuma çok yakın bir değer çok hızlı bir şekilde bulunabilir. Çözüm için kullanılacak Pseudo-kod aşağıda verilmiştir:

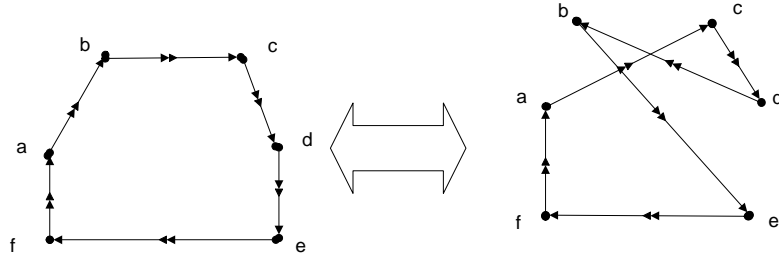
```
#define dist(a,b) dmat[city[a]][city[b]]
do {
  minchange = 0;
  for (i = 0; i < cities-2; i++) {
    for (j = i+2; j < cities; j++) {
      change = dist(i,j) + dist(i+1,j+1) - dist(i,i+1) - dist(j,j+1);
      if (minchange > change) {
        minchange = change;
        mini = i; minj = j;
      }
    }
  }
} while (minchange < 0);
```

3-Opt Algoritması

3-opt algoritması da 2-opt algoritmasına benzer şekilde çalışır. Fakat bu sefer 2 yerine 3 nokta seçilerek yerleri değiştirilir. Bu değişim Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterildiği gibi iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir (Nilsson, 2003).



Şekil 7: 3-opt algoritması (bcd → dbc)



Şekil 8: 3-opt algoritması (bcd → cdb)

K-Opt Algoritması

2 yada 3 nokta seçmek yerine 4 yada daha fazla noktanın seçilmesidir. Fakat k-opt algoritmasının kullanılması ile çözüm çok fazla zaman almasına rağmen oluşacak tur 2-opt ve 3-opt'a göre çok az bir iyileşme gösterir (Nilsson, 2003).

Lin-Kernighan Algoritması

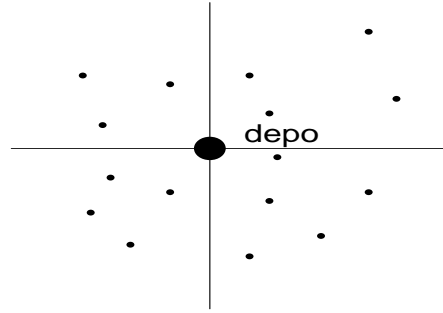
Lin-Kernighan algoritması değişken k-opt algoritması olarak düşünülebilir. Her iterasyonda hangi k değerinin daha uygun olduğuna karar verilir. Bu da algoritmayı oldukça karmaşık bir hale getirir (Nilsson, 2003).

İki Aşamalı Metotlar

İki aşamalı metotların birinci aşamasında, noktalar araçlara kapasiteyi aşmayacak şekilde atanır. İkinci aşamada ise her bir araç için GSP sezgiselleri kullanılarak rota oluşturulur (Eryavuz ve Gencer, 2001).

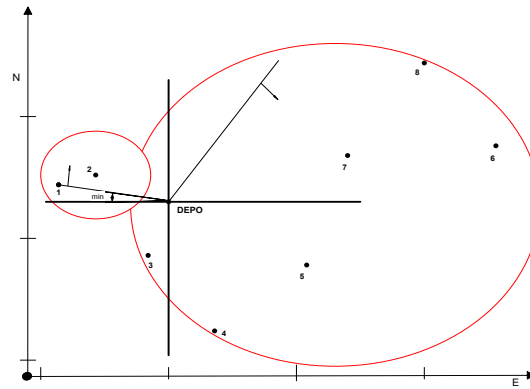
Süpürme (Sweep)

Gillett ve Miller (1971) tarafından geliştirilmiştir. İki aşamalı bir algoritmadır. İlk aşamada, tüm dağıtım noktalarını içeren ve depo merkez kabul edilerek kutupsal koordinat düzlemi Şekil 9'da gösterildiği gibi çizilir. Daha sonra ise her i noktasının merkez depo ve X(doğu-batı) eksenini ile olan θ_i açısı hesaplanır.



Şekil 9: Noktalar ve deponun kutupsal koordinat düzleminde işaretlenmesi

θ_i değeri en küçük olan nokta bulunur ve kapasite limitine ulaşana kadar taranarak noktalar bir kümeye tahsis edilir. Limite ulaşılır ve bir sonraki nokta eklenemezse, bahse konu nokta ikinci nokta kümesine tahsis edilir. Bu şekilde tüm rotalar Şekil 10'daki gibi oluşturulduktan sonra ikinci aşamada atanan rotalar gezgin satıcı problemine göre çözülür. İlk aşamadaki tarama saat yönünde ya da saat yönünün tersinde olabilir. Hangi yöntem en iyi sonucu verirse o kullanılır (Nurcahyo ve diğerleri, 2002).

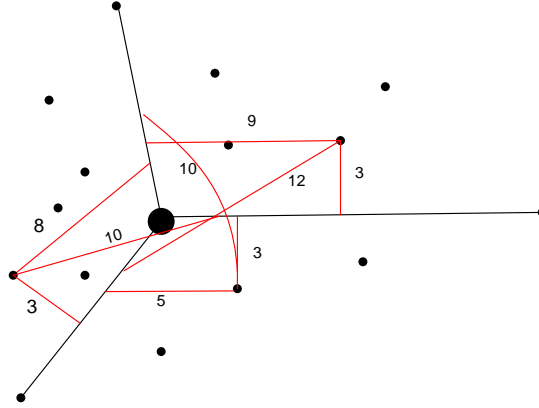


Şekil 10: Noktaların gruplanması

Fisher ve Jaikumar Algoritması

İki aşamalı bir yöntem olan Fisher ve Jaikumar (1981)'in çalışması genelleştirilmiş atama metodu olarak da bilinir. Gruplamanın yapıldığı ilk aşamada ilk önce müşteriler arası mesafeler hesaplanır. Mevcut araç sayısı kadar rota oluşturacağımızı varsayarak, her aracın rotası için bir çekirdek (seed) müşteri belirlenir. Belirlenen müşteriler, birbirlerine olan mesafeleri en uzak olanlardan seçilmelidir. Daha sonra ise noktaların oluşturulan bu rotalara başka bir deyişle nokta

ve depo arasındaki doğrulara uzaklıkları hesaplanır ve kapasite limiti dikkate alınarak en yakın noktalar rotalara Şekil 11'deki örnekte görüldüğü gibi atanır. İkinci aşamada ise belirlenen gruplar GSP sezgiselleri ile çözülür (Ropke, 2005).



Şekil 11: Fisher ve Jaikumar algoritması

Christofides, Mingozzi ve Toth (1979):

Bu yöntem, zaman, mesafe veya kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Kullanıcı tarafından belirlenen $\lambda \geq 1$ ve $\mu \geq 1$ parametrelerine göre iki alternatif sonuç üretir. İki alternatif çözümden en iyisi seçilir. Bu işlem λ ve μ parametrelerinin farklı değerleri için tekrar edilir. İki aşamalı yöntem olarak da bilinir. İlk aşamada seri, ikinci aşamada ise paralel rotalar oluşturulur (Düzakın ve Demircioğlu, 2009; Laporte, 1992).

Geliştirilmiş Petal Sezgiseli:

Bu sezgisel yöntem, Renaud vd. (1996) tarafından önerilmiştir. Petal yöntemi ile turların oluşturulması ve kolon yenileme işlemine göre optimal seçimin yapılmasıdır. Bu sezgisel kısa sürede optimale yakın sonuçlar vermektedir. 1-petal sezgiseli ile tek nokta seçilerek, 2-petal sezgiseli ile de birbirine en uzak iki nokta seçilerek başlangıç turu oluşturulur. 4-opt yöntemiyle de rotalar optimize edilir (Demircioğlu, 2009).

C. Meta Sezgisel Çözüm Yöntemleri

Meta sezgisel çözüm yöntemleri son yıllarda büyük gelişim göstermişlerdir. Klasik sezgisellerle karşılaştırıldığı zaman uygun olmayan ve alt seviyede hareketlere izin vererek çözüm uzayında en iyi çözümün daha verimli bir şekilde aranmasına imkân verirler. Büyük çaplı ve karmaşık problemlerin kesin çözüm yöntemleri ile çözümü çok uzun zaman almasına rağmen, meta sezgisel çözüm yöntemleri ile bu problemler daha makul bir sürede çözülebilirler. Bu nedenle özellikle büyük ve karmaşık problemlerin çözümü için en pratik yol olarak kabul edilirler. En iyi çözüme

yakın sonucu makul sürede sağlayabildikleri için de günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çoğunlukla doğal süreçlerden esinlenerek geliştirilmişlerdir (Şahin ve Eroğlu, 2014; Cordeau ve diğerleri, 2002; Genreau ve diğerleri, 2007).

Tabu Arama

Glover ve Laguna (1989) tarafından geliştirilmiştir. Yerel arama algoritmaları genellikle 2-opt kullanırlar ve sadece pozitif ilerlemelere izin verdikleri için yerel optimumdan ileri gidemezler. Fakat tabu arama algoritması ile negatif yöndeki aramalara da izin verilerek global optimuma ulaşılabilir (Şahin ve Eroğlu, 2014; Nilsson, 2003).

Yasaklı liste tabu aramanın temelidir. Bu liste düzenli olarak güncellenir ve algoritmanın tekrar etmeyecek şekilde çalışmasını sağlar. Fakat üretilen çözüm o ana kadar üretilen en iyi çözümden iyiyse, yasaklı liste içinde olsa bile kabul edilip, yeni çözüm üzerinden devam eder. Genel olarak çözümler döngüsel olarak önce kötüleşir, sonra iyileşmeye başlar.

Optimuma çok yakın çözümü kısa sürede bulabilmesi nedeniyle tabu arama algoritması araç rotalama problemlerinin tüm çeşitleri için en çok kullanılan yöntemlerdendir (Şahin ve Eroğlu, 2014).

Genetik Algoritma

Genetik algoritma problemlerin çözümünde doğal süreçlerin bilgisayar ortamında taklit edilmesidir. Bu şekildeki problem çözme paradigması ilk kez Holland (1975) tarafından önerilmiştir.

Başlangıçta diğer basit sezgisellerden elde edilen çözümle başlanır. Buna başlangıç popülasyonu denir. Bu çözümün her bir parametresi bir gen olarak, çözümün tamamı ise kromozom olarak düşünülür. Kromozomlar ikili (1-1-0-1-0), gerçek değerli (3-4-6-2), SSP ya da ARP için düşünüldüğünde ise sıralamalı (2-3-1-4 yada 0-2-3-0-1-0) şeklinde olabilir. İlk kromozomlar bu şekilde oluşturulduktan sonra, mevcut iki kromozomun çaprazlanmasıyla ya da kromozomun mutasyona uğramasıyla yeni nesil kromozomlar üretilir (offspring). Mutasyon ile genlerin değerlerinde küçük değişiklikler yapılarak lokal minimumlardan kurtulmak amaçlanır. Tüm kromozomlar uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilerek amaç fonksiyonuna en uzak kromozomlar elenir (seçim) ve bu şekildeki iterasyonlarla en iyi kromozom yani optimal çözüm elde edilmeye çalışılır.

Genetik algoritma optimum çözümü bulabilir fakat bunu garanti etmez. Çözüm ilk iterasyonlarda hızlı bir şekilde iyileşir, optimuma yaklaştıkça iyileşme yavaşlar (üssel). Genetik algoritma araç rotalama problemlerinin çözümünde de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla son yıllarda özellikle klasik sezgisel yöntemlerle beraber kullanılarak melez yöntemler geliştirilmiştir (Şahin ve Eroğlu, 2014).

Benzetilmiş Tavlama

Kirkpatrick vd. (1983) tarafından geliştirilmiş olup, temel mantığı pozitif yöndeki ilerlemenin yerine negatifin seçilmesi olasılığının değerinin ilerleyen

tekrarlarda giderek azalmasıdır. Böylece ilk başlarda çözüm bölgeleri arasında sıçrayışlar olurken, optimuma yakın çözüme yaklaşılrken bahsedilen olasılık değeri sifira yaklaşır ve çözüm bölgesi daralır. Böylece küresel optimum yerine yerel optimumların birinde kalma ihtimali de dinamik olarak azalacaktır (Şahin ve Eroğlu, 2014).

Karınca Kolonisi

Dorigo vd.(1991) tarafından geliştirilmiştir. Doğal hayattaki karıncaların hareketlerinin taklit edilerek matematiksel modele aktarılmasına dayanır. Karıncalar geçtikleri yollara feromon denilen bir tür kimyasal ile koku bırakırlar. Diğer karıncalar da bu feromon kokusunu takip ederek muhtemel yiyecek kaynaklarına ulaşırlar. Feromon ayrıca zamanla buharlaşacağı için daha çok karıncanın geçtiği kısa yollarda feromon kokusu daha yoğundur. Feromon kokusunun az olduğu yolları bazı karıncalar tercih etse de, feromonun yoğun olduğu yolların karıncalar tarafından tercih edilmesi ihtimali daha yüksektir. Bu şekilde belli bir zaman sonra uzun yolların kullanımı engellenerek, en kısa yol karıncalar tarafından işaretlenmiş olur (Şahin ve Eroğlu, 2014; Nilsson, 2003).

Karınca kolonisi algoritması temelde gezgin satıcı problemini çözmek için oluşturulmasına rağmen, son yıllarda yapılan çalışmalarda modele birden fazla dağıtım aracı, kapasite gibi kısıtlarda eklenerek araç rotalama problemlerinin de çözülebildiği görölmektedir (Şahin ve Eroğlu, 2014).

Yapay Arı Kolonisi

Karaboğa (2005) tarafından doğada arıların yiyecek arama metotlarının benzetimine dayanarak geliştirilmiş bir algoritmadır. Algoritma görevli ve görevsiz işçi arılar, yiyecekler ile negatif ve pozitif geri beslemelerden oluşur. Görevli işçi arılar, belirli kaynaklardan yiyecekleri getirirler ve arı kovanındaki dans alanında bu kaynakların yer ve kalite bilgilerini diğer arılara iletirler. Görevsiz işçi arılar, kaşif ve gözcü olmak üzere iki çeşittir ve yeni kaynaklar ararlar. Kovandaki tüm arıların %5-10'u kaşif arılardan oluşur (Şahin ve Eroğlu, 2014).

Szeto vd. (2011) bu algoritmayı kullanarak kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinin de çözülebildiğini göstermiştir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından doğrusal olmayan problemler için kuş sürülerinin davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir. Kuşlar besin ararken buna en yakın kuşun peşinden giderler. Benzer şekilde bu algoritmada olası muhtemel çözümler parçacık olarak adlandırılır ve parçacıklar aralarındaki bilgi paylaşımı sayesinde o anki en iyi parçacığı izleyerek çözüm uzayında dolaşırlar. Uygulamaya herhangi bir çözümlerle başlanır ve değışimlerle en iyi çözüm bulunmaya çalışılır. Algoritmada kullanılan parametre sayısının az olması nedeniyle parçacık sürü optimizasyonunun uygulanması kolaydır (Çevik ve Koçer, 2013).

V. Uygulama

Örnek bir kapasite kısıtlı araç rotalama problemi için Ege Bölgesi ele alınmıştır. Her ilin talep değeri, nüfusunun binde biri kadardır ve bu talepleri karşılamak için elimizde her biri 5000 birim kapasiteli 3 adet aracımız vardır. Problem Clarke ve Wright Tasarruf ve Sweep (süpürme) algoritmaları ile çözülmüştür. Bu maksatla oluşturulan bölgedeki 8 ilin kutupsal koordinatları, 2014 yılı nüfusları ve talep değerleri aşağıdaki Tablo 1'de gösterilmiştir (www.tuik.gov.tr, www.google.com/maps).

Tablo 1: Noktaların koordinat, nüfus ve talepleri

İL	KOORDİNAT		NÜFUS	TALEP (N/1000)
	N	E		
İZMİR	38,42	27,13	4113072	4113
AYDIN	37,86	27,84	1041979	1042
MUĞLA	37,22	28,36	894509	895
MANİSA	38,62	27,43	1367905	1368
UŞAK	38,68	29,41	349459	350
DENİZLİ	37,78	29,09	978700	979
KÜTAHYA	39,42	29,98	571554	572
AFYON	38,75	30,56	706371	706

Depo yerinin belirlenebilmesi için ağırlık merkezi yönteminin uygulanması Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Ağırlık merkezi yöntemi ile depo yerinin belirlenmesi

İL	TALEP (L)	KOORDİNAT		L.N	L.E
		N	E		
İZMİR	4113	38,42	27,13	158021,46	111585,69
AYDIN	1042	37,86	27,84	39450,12	29009,28
MUĞLA	895	37,22	28,36	33311,90	25382,20
MANİSA	1368	38,62	27,43	52832,16	37524,24
UŞAK	350	38,68	29,41	13538,00	10293,50
DENİZLİ	979	37,78	29,09	36986,62	28479,11
KÜTAHYA	572	39,42	29,98	22548,24	17148,56
AFYON	706	38,75	30,56	27357,50	21575,36
TOPLAM	10025,00			384046,00	280997,94

$$\text{Depo yeri için: } N = \frac{\sum L \cdot N}{\sum L} = \frac{384046,00}{10025,00} = 38,31 \text{ E} = \frac{\sum L \cdot E}{\sum L} = \frac{280997,94}{10025,00} = 28,03$$

38,31 N ve 28,03 E koordinatlarına en yakın ilçe 38,23 N ve 27,97 E koordinatlarındaki ÖDEMİŞ ilçesidir. Depo buraya kurulmalıdır. Depo ve noktaların mesafe matrisi Tablo 3 'deki gibidir (www.google.com/maps).

Tablo 3: Depo ve noktaların mesafe matrisi

	ÖDEMiŞ	İZMİR	AYDIN	MUĞLA	MANİSA	UŞAK	DENİZLİ	KÜTAHYA	AFYON
ÖDEMiŞ	0	118	77	208	88	176	145	299	286
İZMİR	118	0	115	239	40	218	234	341	328
AYDIN	77	115	0	126	136	220	128	370	327
MUĞLA	208	239	126	0	247	271	137	418	336
MANİSA	88	40	136	247	0	194	210	317	304
UŞAK	176	218	220	271	194	0	149	142	110
DENİZLİ	145	234	128	137	210	149	0	289	220
KÜTAHYA	299	341	370	418	317	142	289	0	96
AFYON	286	328	327	336	304	110	220	96	0

A. Tasarruf Algoritması ile Çözüm

Tasarruf algoritması ile çözüm için $S_{ij} = C_{0i} + C_{0j} - C_{ij}$ formülüne göre oluşturulan tasarruf matrisi tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4: Tasarruf Matrisi

	İZMİR	AYDIN	MUĞLA	MANİSA	UŞAK	DENİZLİ	KÜTAHYA	AFYON
İZMİR	0	80	87	166	76	29	76	76
AYDIN		0	159	29	33	94	6	36
MUĞLA			0	49	113	216	89	158
MANİSA				0	70	23	70	70
UŞAK					0	172	333	352
DENİZLİ						0	155	211
KÜTAHYA							0	489
AFYON								0

Seri Tasarruf Algoritması

Tablodaki tasarruf değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve sırasıyla mümkün olan ikililer alt tura eklenerek çözüme devam edilir. İlk oluşturulan tur ilk araca ait olup, kapasitesi dolana kadar ve mümkün bir bağlantı varsa şehir eklenmeye devam edilir. Her bir ekleden sonra daha önce eklenemeyen ikililere tekrar bakılır. Aşağıda sırasıyla turların oluşturulması ele alınmıştır:

489: Kütahya-Afyon (Talep:572+706=1278)

352: Kütahya-Afyon-Uşak(Talep:1278+350=1628)

333:Uşak ve Kütahya'nın bağlanması mümkün değil.

216: Muğla ve Denizli'nin bağlanması yeni bir rota oluşturacağı için seri tasarruf algoritmasında kabul edilmez.

211: Afyon ve Denizli'nin bağlanması mümkün değil.

172: Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli(Talep:1628+979=2607)

216: Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla(Talep:2607+895=3502)

166: Manisa ve İzmir yeni bir rota oluşturacağı için kabul edilmez.

159:Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla-Aydın(Talep:3502+1042=4544)

Kalan şehirler (İzmir ve Manisa) 5000 br. kapasiteyi aşmadan bu rotaya eklenemeyeceği için bu rota burada sonlandırılır.

166: İzmir ve Manisa toplam talepleri (4113+1368=5481) 5000 br. kapasiteyi aşacağından dolayı ayrı rotalara tahsis edilmelidir.

Böylece rotalar:

1. Ödemiş-Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla-Aydın-Ödemiş
(299+96+110+149+137+126+77=994 km.)
2. Ödemiş-İzmir-Ödemiş (118+118=236 km.)
3. Ödemiş-Manisa-Ödemiş (88+88=176 km.)

Toplam:994+236+176=**1406 km.** olarak bulunur.

Paralel Tasarruf Algoritması

Paralel tasarruf algoritmasında, mevcut rotaya eklenemeyen kenarlar için yeni rota açılmaktadır. Ayrıca ikililere bakılırken rotaların birleştirilip birleştirilemeyeceği de kontrol edilmektedir.

489: Kütahya-Afyon (Talep:572+706=1278)

352: Kütahya-Afyon-Uşak(Talep:1278+350=1628)

333:Uşak ve Kütahya'nın bağlanması mümkün değil.

216: Muğla-Denizli(2.rota,Talep:895+979=1874)

211: Afyon ve Denizli'nin bağlanması mümkün değil.

172: Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla(Talep:1628+1874=3502,İki rota birleştirildi)

166: İzmir ve Manisa toplam talepleri (4113+1368=5481) 5000 br aştığı için bu rota oluşturulamaz.

159:Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla-Aydın(Talep:3502+1042=4544)

İzmir ve Manisa toplam talepleri (4113+1368=5481) 5000 br. kapasiteyi aşacağından dolayı ayrı rotalara tahsis edilmelidir.

Böylece rotalar:

1. Ödemiş-Kütahya-Afyon-Uşak-Denizli-Muğla-Aydın-Ödemiş
(299+96+110+149+137+126+77=994 km.)
2. Ödemiş-İzmir-Ödemiş (118+118=236 km.)
3. Ödemiş-Manisa-Ödemiş (88+88=176 km.)

Toplam:994+236+176=**1406 km.** olarak bulunur. Bu sonuç tasarruf algoritmasına göre optimal sonuçtur. Paralel ve seri tasarruf algoritmaları aynı sonucu vermiştir.

B. Sweep (Süpürme) Algoritması ile Çözüm

Sweep (süpürme) algoritması ile çözüm için depo ve şehirlerin kutupsal koordinat sistemindeki yerleri işaretlenir. Depo yeri merkez kabul edilerek, noktaların depo ve doğu-batı ekseninde oluşan $\min\theta$ değerini sağlayan şehir (İzmir) başlangıç kabul edilir.

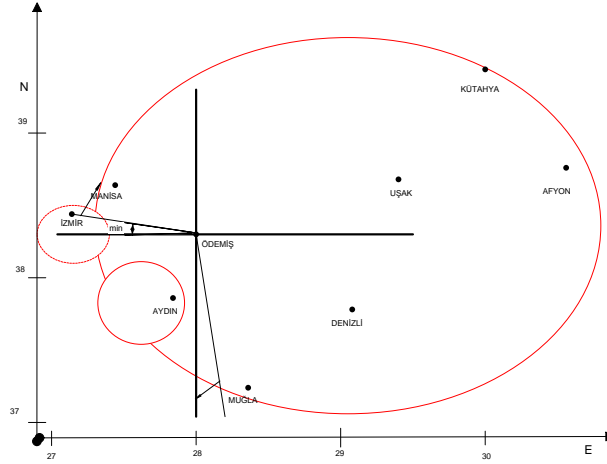
Saat Yönünde Çözüm (Şekil 12)

1. Aşama (Gruplama)

1. grup: İzmir (Talep: 4113)
2. grup: Manisa, Kütahya, Uşak, Afyon, Denizli, Muğla
(Talep: $1368+572+350+706+979+895=4870$)
3. grup: Aydın (Talep: 1042)

2. Aşama (Rotalama-En Yakın Komşu Algoritması)

1. Ödemiş-İzmir-Ödemiş ($118+118=236$ km.)
 2. Ödemiş-Manisa-Uşak-Afyon-Kütahya-Denizli-Muğla-Ödemiş
($88+194+110+96+289+137+208=1122$ km.)
 3. Ödemiş-Aydın-Ödemiş ($77+77=154$ km.)
- Toplam: $236+1122+154=1512$ km. olarak bulunur.



Şekil 12: Saat yönünde çözüm

Saat Yönünün Tersinde Çözüm (Şekil 13)

1. Aşama (Gruplama)

1. grup: İzmir (Talep: 4113)
2. grup: Aydın, Muğla, Denizli, Afyon, Uşak, Kütahya
(Talep: $1042+895+979+706+350+572=4544$)
3. grup: Manisa (Talep: 1368)

2.Aşama(Rotalama-En Yakın Komşu Algoritması)

1. Ödemiş-İzmir-Ödemiş (118+118=236 km.)

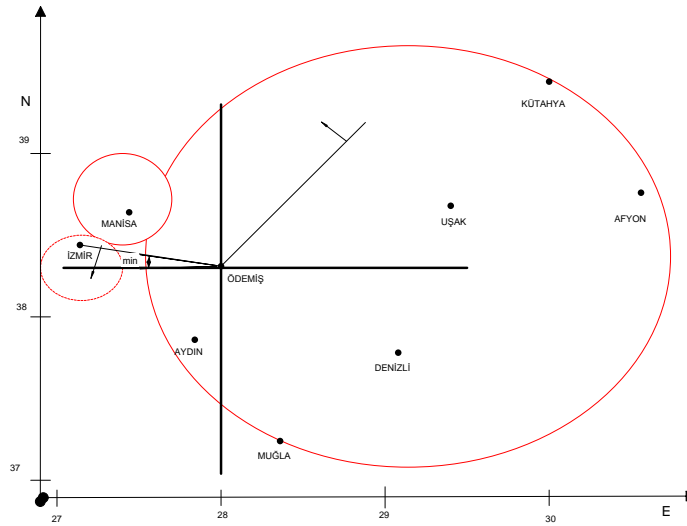
2.Ödemiş-Aydın-Muğla-Denizli-Uşak-Afyon-Kütahya-Ödemiş
(77+126+137+149+110+96+299=994 km.)

3.Ödemiş-Manisa-Ödemiş (88+88=176 km.)

Toplam: 236+994+176=**1406 km.** olarak bulunur. Bu sonuç sweep algoritmasına göre en iyi sonuçtur. Saat yönünün tersinde tarama yapılarak bu sonuç bulunmuştur.

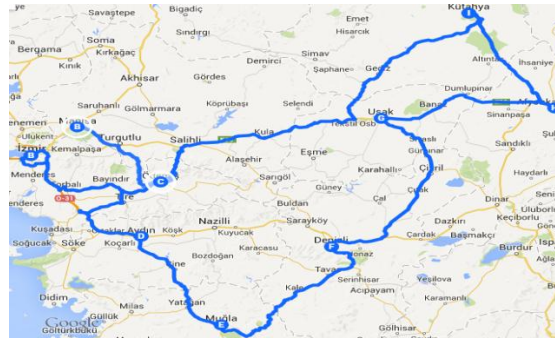
Araç Rotalama
Problemleri ile
Çözüm
Yöntemlerinin
Sınıflandırılması
ve Bir Uygulama

101



Şekil 13: Saat yönünün tersinde çözüm

Tasarruf algoritması ve sweep (süpürme) algoritmaları aynı rotaları oluşturmuştur. Rotaların haritadaki çizimi Şekil 14'te görülmektedir.



Şekil 14: Tasarruf ve Sweep (süpürme) algoritmalarında oluşan rotalar

VI. Sonuç

Bu çalışmada, Araç Rotalama Problemi tanıtılmış, çeşitleri üzerinde durulmuş ve çözüm yöntemleri açıklanmıştır. Çözüm yöntemleri genel olarak analiz edildiğinde, her birinin avantaj ve dezavantajları olduğu görülmektedir. Kesin çözüm yöntemleri optimum çözümü garanti ederken, büyük boyutlu problemlerde çözümün elde edilmesi çok fazla zaman alabilir, ayrıca iyi bir programlama bilgisi de gerektirir. Klasik sezgisellerin uygulanması oldukça basit ve kısa olmasına rağmen optimum veya optimuma çok yakın çözümü garanti etmezler. Meta sezgisel çözüm yöntemleri ile ise iyi bir programlama seviyesine sahip olduğunda optimuma çok yakın çözüm kısa süre içerisinde bulunabilir. Bu nedenle son yıllardaki çalışmalarda en fazla meta sezgisel çözüm yöntemleri tercih edilmektedir. Bununla beraber, uygulamadaki örnek problemin çözümünde iki klasik sezgiselin fazla karmaşık olmayan bir durumda rahatlıkla tatmin edici bir çözüm verebildikleri de görülmektedir.

ARP problemleri, uygulamada yoğun bir şekilde ancak daha çok ilgili yöneticilerin, dağıtım veya taşıma yapan firmaların tecrübelerine göre sezgisel olarak kullanılmaktadır. Burada kullanılan sezgisel kelimesi, insanların sezgileri, bilgileri manasında kullanılmıştır. Bu çalışmada ele alınan ARP çeşitleri ve çözüm yöntemleri kullanılarak çok daha iyi planlama yapmak mümkündür. Bu konuda, özellikle ülkemiz ele alındığında yeterli bilimsel çalışmanın yapılmadığı, ele alınan ve diğer tekniklerin rota planlamasında kullanılmadığı bilinmektedir. Yaptığımız bu çalışma ile ARP çeşitleri ve çözüm yöntemlerinin tanıtılması, bu konuda çalışma yapan akademisyenlere ve karar verici konumda bulunan yöneticilere genel bir fikir vermek amaçlanmıştır. Gerçek hayat ARP uygulamalarının hangi probleme benzediğine karar verilerek, belki bir kısım değişiklikler yapılarak ve uygun olan çözüm yöntemleri seçilerek daha iyi planlama yapılabileceği düşünülmektedir. Bu sayede hem ilgili kurumların dağıtım ve taşıma maliyetleri indirgenebilir hem de daha iyi rotalama sayesinde trafik yoğunluğu, çevre kirliliği, kaza riski, araç yıpranmaları gibi farklı konularda da katkı sağlanabilir. ARP problemleri ve çözüm teknikleri ile ilgili geliştirilecek online bilgi sistemleri ile entegre yazılımlarla da bu alana katkı sağlanabilir.

Kaynakça

Altıparmak, F., Dengiz, B., Kara, İ., Karaoğlan İ. (2008). Eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi için yeni matematiksel formülasyonlar. sayfa no. 130.YA/EM 2008-Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXVIII. Ulusal Kongresi Bildiri Özetleri Kitabı, Galatasaray Üniversitesi, İstanbul, 30 Haziran - 2 Temmuz

Araque, J.R., Kudva, G., Morin, T.L., Pekny, J.F., (1994). A branch-and-cut algorithm for vehicle routing problems. Annals of Operations Research 50, 37-59.

Atmaca, E., (2012). Bir Kargo Şirketine Araç Rotalama Problemi ve Uygulaması. Türk Bilim Araştırma Vakfı Dergisi, Cilt:5, Sayı:2, Sayfa: 12-27

Avcı, M., Topaloğlu, Ş., (2015). An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries, *Computers & Industrial Engineering*, 83, 15–29

Balas, E., Toth, P., (1983). Branch and bound methods for the traveling salesman problem. *Management Science Research Report No. MSRR 488*.

Başkaya Z., Avcı Öztürk, B., (2005). Tamsayılı programlamada dal kesme yöntemi ve bir ekmek fabrikasında oluşturulan araç rotalama problemine uygulanması. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Cilt XXIV, Sayı 1, s. 101-114*.

Bellmore, M., Nemhauser G.L., (1966). The Travelling Salesman Problem: A Survey. *Operations Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 538-558.

Bozyer, Z., Alkan, A., Fiğlalı, A., (2014). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Önce Grupla Sonra Rotala Merkezli Sezgisel Algoritma Önerisi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 2*

Chauhan, C., Gupta, R., Pathak, K., (2012). Survey of Methods of Solving TSP along with its Implementation using Dynamic Programming Approach. *International Journal of Computer Applications (0975–8887) Volume 52– No.4*.

Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., (1979) *The Vehicle Routing Problem In Combinatorial Optimization*. Wiley Chichester.

Clarke, G., Wright, J.W., (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, Vol. 12, pp. 568-581

Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., Semet, F., (2002). A Guide to Vehicle Routing Heuristics. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 5 pp. 512-522.

Croes, G.A., (1958). A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. *Operations Research*, Vol. 6, pp. 791-812.

Çevik, K.K., Koçer, H.E., (2013). Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Yapay Sinir Ağları Eğitime Dayalı Bir Esnek Hesaplama Uygulaması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17 (2), 39-45*.

Dantzig, G.B., Ramser J.B., (1959) The Truck Dispatching Problem. *Management Sci.* 6, 80-91

Dantzig, G.B., Fulkerson, R., Johnson, J., (1957). Solution of a Large Scale Travelling Salesman Problem, *J. Opns. Res. Soc.* 4, 266-277

Demiral, M. F. 2008. "Servis Araçlarının Rotalanmasında Optimizasyon ve Bir Uygulama," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta.

Demircioğlu, M., (2009). Araç Rotalama Probleminin Sezgisel Bir Yaklaşım İle Çözülmesi Üzerine Bir Uygulama. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A., (1991). Positive Feedback as a Search Strategy. Technical Report N. 91-016, Politecnico di Milano.

Duhamel, C., Potvin, J.-Y., & Rousseau, J.-M. (1997). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with backhauls and time windows. *Transportation Science*, 31(1), 49-59.

Düzakın, E., Demircioğlu, M., (2009). Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi Cilt:13. Sayı:1, ss.68-87.

Erol, V., (2006). Araç Rotalama Problemleri İçin Popülasyon ve Komşuluk Tabanlı Metasezgisel Bir Algoritmanın Tasarımı ve Uygulaması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sistem Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Kütüphanesi, İstanbul.

Eryavuz, M., Gencer, C., (2001). Araç Rotalama Problemlerine Ait Bir Uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi C.6, S.1, s.139-155.

Fisher, M.L., Jaikumar, R., (1981). A Generalized Assignment Heuristic For Vehicle Routing. *Networks* 11, 109-124.

Flood, M., (1955). The Travelling-Salesman Problem, *J.Opns.Res.Soc.*4, 61-75

García-Nájera, A., Bullinaria John. A. , Gutiérrez-Andrade, Miguel A., (2015). An evolutionary approach for multi-objective vehicle routing problems with backhauls", *Computers & Industrial Engineering* 81 90-108.

Gaskell, T.J., (1967). Basis For Vehicle Fleet Scheduling. *Opl. Res. Q.* , 281.

Genreau, M., Potvin, J.Y., Braysy, O., Hasle, G., Lokketangen, A., (2007). Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: a categorized bibliography. CIRRELT-2007-27.

Gillett, B.E., Miller, L.R., (1971). A Heuristic Algorithm For the Vehicle Dispatch Problem. *Operation Research*, vol. 22: 340-349

Glover, F., Laguna, M., (1989). Tabu Search-Part I. ORSA Journal on Computing,1 (3): 190-206.

Holland, J.H., (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

Irnich, S. (2008). Solution of real-world postman problems. European Journal of Operational,vol. 190, No. 1, October 2008, 52-67, ISSN: 0377-2217

Karaboğa, D., (2005). An Idea Based on Honey Bee Swarm For Numerical Optimization. Technical Report, TR-06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Faculty.

Kennedy, J., Eberhart, C., (1995). Particle Swarm Optimization. Proc. of IEEE International Conference on Neural Network, Piscataway, NJ. s. 1942-1948.

Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. Jr., Vecchi, (1983). Optimization by simulated annealing. M.P. Science, 220, (4598): 671–680.

Kumar, S.N., (2012). Panneerselvam, R., A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. Intelligent Information Management, 4, 66-74.

Langevin, A. & Soumis, F. (1989). Design of multiple-vehicle delivery tours satisfying timeconstraints. Transportation Research Part B, Vol. 23, No. 2, April 1989, 123-138, ISSN:0191-2615

Laporte, G., (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research 59, 345-358.

Li, Jian., . Pardalos, Panos M ., Sun, Hao., Pei,Jun., Zhang,Yong., (2015). "Iterated local search embedded adaptive neighborhood selection approach for the multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups, Expert Systems with Applications vol. 42, pp. 3551–3561

Lysgaard J., (1997). Clarke & Wright's Savings Algorithm. Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, Fuglesangs Allé 4, DK-8210 Aarhus V, September

M. E.McNabb, J. D.Weir,R. R.Hill,S.N.Hall, (2015). Testing local search move operators on the vehicle routing problem with split deliveries and time windows", Computers &OperationsResearch, vol. 56, pp. 93–109.

Mitrovic-Minic, S. & Laporte, G. (2006). The pickup and delivery problem with time

N. Norouzi, M. Sadegh-Amalnick, M. Alinaghiyan, (2015). Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem, *Measurement*, vol. 62, pp. 162–169.

Nilsson, C., (2003). *Heuristics for the Traveling Salesman Problem*. Linköping University.

Nurcahyo, G.W., Alias, R.A., Shamsuddin, S.M., Sap., M.N.M., (2002), Sweep Algorithm in Vehicle Routing Problem For Public Transport. *Jurnal Antarabangsa (Teknologi Maklumat) 2(2002): 51-64.*

Orhan, B., Kapanoğlu, Muzaffer. ve Karakoç, T. Hikmet, (2010). Havayolu Operasyonlarında Planlama ve Çizelgeleme Planning and Scheduling of Airline Operations, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Oropeza, A., Cruz-Chávez, M., Cruz-Rosal Martín H. es, P. Bernal, J .C.Abarca , (2012) Unsupervised Clustering Method for the Capacited Vehicle Routing Problem, Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Mexico

Öztürk, N., Küçüköğlü, İ., (2013). A differential evolution approach for the vehicle routing problem with backhauls and time windows, *Journal of Advanced Transportation* published online in Wiley Online Library DOI: 10.1002/atr.1237

Pan, L., (2015). Cutting Plane Method. *The Chinese University of Hong Kong, Operations Research and Logistics* Jan. 20.

Rand, G.K., (2009). The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems. *Orion* Volume 25 (2), pp. 125–145.

Renaud, J., Boctor, F.F., Laporte, G., (1996). An Improved Petal Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Journal of Operational Research Society*, c. 47, sf. 329-336.

Ropke, S., (2005). Heuristic and exact algorithms for vehicle routing problems.

Solomon, M.M., (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, Vol. 35, No. 2., pp. 254-265.

Sombuntham, P., & Kachitvichyanukul, V. (2010). Multi-depot vehicle routing problem with pickup and delivery requests. *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, 5, 71–85

Szeto, W., Wu, Y., Ho, S.C., (2011). An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem. European Journal of Operational Research, 215, 126–135.

Şahin, Y., Eroğlu, A., (2014). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi İçin Metasezgisel Yöntemler: Bilimsel Yazın Taraması. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi C.19, S.4, s.337-355.

Toth, P., Vigo, D., (2002). The Vehicle Routing Problem. windows and transshipment. Inform, vol. 44, no. 217-227, ISSN:0315-5986

www.google.com/maps

www.tuik.gov.tr

Yellow, P., (1970). A Computational Modification To The Savings Method Of Vehicle Scheduling. Operational Research Quarterly, Vol. 21, 281.

Araç Rotalama
Problemleri ile
Çözüm
Yöntemlerinin
Sınıflandırılması
ve Bir Uygulama