

T.C.
KARA HARP OKULU
SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAREKAT ARAŞTIRMASI ANA BİLİM DALI

AĞIR MALZEME TAŞIMACILIĞINDA
ENERJİ ENKÜÇÜKLEMELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazırlayan
Ali ATAV

Tez Danışmanı
Doç. Dr.Aydın SİPAHİOĞLU

ANKARA - 2012

Azarin Notu: Bu tezde belirtilen görüŖ ve yorumlar
sana Aittir. Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ya da diğeri
bu kuruluşlarının görüşlerini yansıtmaz.

Author's Note: The views and comments expressed in
s thesis are the author's and do not necessarily
reflect those of Turkish Armed Forces or other
government agencies.



İmza(Signature)

TEZ TANITIM FORMU

TEZİN TARİHİ : 25.05.2012

TEZİN TİPİ : Yüksek Lisans Tezi

TEZİN BAŞLIĞI : Ağır Malzeme Taşımacılığında Enerji Enküçüklemeli Araç Rotalama Problemi

TEZİN YAPILDIĞI BİRİM : Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü Harekat Araştırması Ana Bilim Dalı

SPONSOR KURULUŞ : -

DAĞITIM LİSTESİ : Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü Tez Hazırlama, Onay, Dağıtım ve Muhafaza Esasları Kılavuzunda Belirtilen Yerlere

TEZİN ÖZETİ : Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi (AKERP), bir serim üzerindeki düğümlerde tanımlanmış müşteri taleplerinin açık turlar izleyen araçlarla toplamda en az sera gazı salınımını (SGS) sağlayacak şekilde karşılanması olarak tanımlanabilir. Problemde araç filosu özdeş veya farklı özelliklerde olabileceği gibi müşterilere hem ürün dağıtma hem de toplama şeklinde iki kere uğramak gibi özel durumlar da olabilir. Özellikle mühimmat, araç motor ve motor düzenleri gibi ağır malzemelerin taşınmasında hem taşımayı gerçekleştiren araçların yarattığı SGS açısından hem de taşıma ve toplamının bir arada olması nedeniyle AKERP ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada SGS'nin enküçüklendiği, taşıma ve toplamının bir arada yapılmasının gerektiği heterojen filolu bir AKERP tanımlanmış, çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : Araç Rotalama, Açık Turlu Araç Rotalama, Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi, Heterojen Filo, Kombinatoryal Problem, Yeşil Lojistik, Dağıtım-Toplama

SAYFA SAYISI : 86

GİZLİLİK DERECESESİ : Tasnif Dışı

KARA HARP OKULU

SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ali ATAV'ın, Ağır Malzeme Taşımacılığında Enerji Enküçüklemeli Araç Rotalama Problemi konulu tez çalışması, jürimiz tarafından HAREKAT ARAŞTIRMASI Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof.Dr.Cevriye GENCER

Üye

Doç. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU
(Danışman)

Üye

Yrd. Doç. Dr. Mu. Bnb. İbrahim
AKGÜN

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

25 / 05 / 2012



Ali IŞIK

Yrd.Doç.Dr.Öğ.Alb.
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Başta Kara Harp Okulu Komutanı Tümgeneral Ferit GÜLER olmak üzere Kara Harp Okulu Komutanlığı'na, Enstitü Müdürü Yrd. Doç. Dr. Öğ. Alb. Ali IŞIK ve tüm Enstitü personeline, bu çalışmanın vücuda gelmesinde engin tecrübeleri ile bana yol gösteren ve bir eğitmenden daha öte bir ilgi ile destek olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Aydın SİPAHIOĞLU'na ve Enstitüye katıldığım andan itibaren bana yol gösteren, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen Anabilim Dalı Başkanım Dr.P.Yb.Erkan KÖSE'ye teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Hayatım boyunca örnek aldığım ve varlıklarıyla gurur duyduğum sevgili annem Nilgün GÜNEYSU'ya ve babam Kadri ATAV'a, başarılarımla sevinen, üzüntülerimle üzülen eğitimim süresince bana hep destek veren, sabır ve anlayış gösteren sevgili eşim Ayşen Deniz ATAV'a ve tüm aileme minnettarım.

Son olarak, gerek derslerde, gerekse tez çalışmamda desteklerini, ilgi ve alakalarını esirgemeyen değerli silah arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

T.C.
KARA HARP OKULU
SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAREKAT ARAŞTIRMASI ANA BİLİM DALI
ANKARA 2012

**AĞIR MALZEME TAŞIMACILIĞINDA
ENERJİ ENKÜÇÜKLEMELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali ATAV

ÖZET

Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi (AKERP), bir serim üzerindeki düğümlerde tanımlanmış müşteri taleplerinin açık turlar izleyen araçlarla toplamda en az sera gazı salınımını (SGS) sağlayacak şekilde karşılanması olarak tanımlanabilir. Problemden araç filosu özdeş veya farklı özelliklerde olabileceği gibi müşterilere hem ürün dağıtma hem de toplama şeklinde iki kere uğramak gibi özel durumlar da olabilir. Özellikle mühimmat, araç motor ve motor düzenleri gibi ağır malzemelerin taşınmasında hem taşımayı gerçekleştiren araçların yarattığı SGS açısından hem de taşıma ve toplamanın bir arada olması nedeniyle AKERP ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada SGS'nin enküçüklendiği, taşıma ve toplamanın bir arada yapılmasının gerektiği heterojen filolu bir AKERP tanımlanmış çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Araç Rotalama, Açık Turlu Araç Rotalama, Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi, Heterojen Filo, Kombinatoriyal Problem, Yeşil Lojistik, Dağıtım-Toplama

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Aydın SİPAHIOĞLU

Sayfa Sayısı : 86

T.C.
TURKISH MILITARY ACADEMY
DEFENSE SCIENCE INSTITUTE
DEPARTMENT OF OPERATIONS RESEARCH
ANKARA 2012

**ENERGY MINIMIZING VEHICLE ROUTING
IN HEAVY DUTY TRANSPORTATION
MASTER THESIS**

Ali ATAV

ABSTRACT

Open Pollution Routing Problem (OPRP) can be defined as supplying the demands of the customers that are defined on the vertices of a network by minimizing the total emission of green house gases (GHG) of vehicles following open tours. In OPRP, there can be special cases like homogeneous or heterogeneous fleet of vehicles, as well as visiting the customers twice, one for delivery and one for pick up. One can encounter OPRP in the heavy duty transportation especially like ammunition or vehicle engine transportation because of the GHG emissions of the vehicles used in transportation and also because of the need for delivery – pick up together. In this study, a mathematical model which minimizes the GHG emissions with the heterogeneous fleet of vehicles performing delivery and pick up together in the OPRP is proposed.

Keywords : Vehicle Routing, Open Tour Vehicle Routing, Pollution Routing Problem, Heterogeneous Fleet, Combinatorial Problem, Green Logistics, Delivery and Pick-up

Advisor : Doç. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

Number of Pages : 86

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar	vi
ŞEKİLLER.....	viii
KISALTMALAR	viii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ROTALAMA PROBLEMLERİ

1. ROTALAMA PROBLEMLERİNDE BAZI TANIMLAMALAR VE GÖSTERİMLER.....	6
2. DÜĞÜM ROTALAMA PROBLEMLERİ	7
3. AYRIT ROTALAMA PROBLEMLERİ	11

İKİNCİ BÖLÜM

ARAÇ ROTALAMAYLA İLGİLİ YENİ PROBLEMLER

1. AĞIR MALZEME TAŞIMA PROBLEMİ	14
2. BİRİKİMLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ	17
3. KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA PROBLEMİ (KERP).....	20
a. KERP İçin Kullanılan Yakıt Tüketim Fonksiyonu	22
b. KERP Matematiksel Modeli	25
4. YEŞİL LOJİSTİK VE UYGULAMALARI	29

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
AÇIK TURLU KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA
PROBLEMİ

1. AÇIK ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ	33
2. AÇIK TURLU KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA PROBLEMİ. 36	
a. Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Probleminin Tanıtımı37	
b. AKERP Matematiksel Modeli	41

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
TEST PROBLEMLERİ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

1. TEST PROBLEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ	53
2. AMAÇ FONKSİYON DEĞERLERİ VE ÇÖZÜM SÜRELERİNE	
İLİŞKİN HESAPSAL SONUÇLAR.....	56

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

1. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKÇA	62
EKLER	69

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo-1: Boyut Analizi Tablosu.....	47
Tablo-2: Seçilen Test Problemlerinin Özellikleri.....	54
Tablo-3: Seçilen Test Problemlerinin Açık Turlu Dağıtım Çözümleri .	56
Tablo-4: Türetilen Test Problemlerinin Açık Turlu Dağıtım ve Toplama Çözümleri.....	58

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil-1: a) Hamilton Turu, b) Hamilton Yolu (Path)	8
Şekil- 2: a) Köningsberg Köprüleri-1736, b) Köningsberg Köprüleri'nin Serim Gösterimi	11
Şekil-3: Örnek Serim	15
Şekil-4: Hızın Bir Fonksiyonu Olarak Yakıt Tüketimi	16
Şekil-5: a) Açık ARP b) Klasik ARP	33
Şekil-6: Hayali Düğümün Şekil İle Gösterimi	42

KISALTMALAR LİSTESİ

AARP	: Açık Araç Rotalama Problemi
AKERP	: Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi
AKRP	: Açık Kirlilik Rotalama Problemi
ARP	: Araç Rotalama Problemi
BAARP	: Birikimli Açık Araç Rotalama Problemi
BARP	: Birikimli Araç Rotalama Problemi
ÇDARP	: Çok Depolu Araç Rotalama Problemi
ÇPP	: Çinli Postacı Problemi
DARP	: Dönemlik Araç Rotalama Problemi
DTARP	: Dağıtımli-Toplamalı Araç Rotalama Problemi
EEARP	: Enerji Enküçüklemeli Araç Rotalama Problemi
GRP	: Genel Rotalama Problemi
GSP	: Gezgin Satıcı Problemi
GTARP	: Geri Toplamalı Araç Rotalama Problemi
GTP	: Gezgin Tamirci Problemi
HÇPP	: Hiyerarşik Çinli Postacı Problemi
KARP	: Kapasiteli Araç Rotalama Problemi
KERP	: Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi
KPP	: Kırsal Postacı Problemi
KRP	: Kirlilik Rotalama Problemi
KTARP	: Kısmi Teslimatlı Araç Rotalama Problemi
OARP	: Olasılıklı Araç Rotalama Problemi
RÇPP	: Rüzgârlı Çinli Postacı Problemi
SGS	: Sera Gazları Salınımı
ZPARP	: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

GİRİŞ

Araç rotalama problemi literatüre 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından tanıtıldığından beri üzerinde en çok çalışılan kombinatoryal eniyileme problemlerinden biridir.

Ürün ya da eşyaların depo ya da depolardan diğer depolara veya kullanıcılara dağıtımı veya toplanması; hemen hemen tüm organizasyonlar tarafından kullanılan bir uygulamadır. Ticari lojistik firmalarının ana merkezleri ile şubeleri arasındaki toplama ve dağıtma işlemleri gibi, kamu kurum ve kuruluşlarında da taşıma işlemleri çeşitli malzeme, araç veya gerecin dağıtım ve toplanmasını gerektirmektedir. Günlük olarak hizmet veren personel servislerinden temizlik hizmetlerine, periyodik bakım işlemlerinden acil onarım ve hizmetlere kadar birçok taşıma işlemi sürekli olarak icra edilmektedir. Bu işlemler için elde mevcut araç, araçlar ya da kişiler için en iyi rotalar belirlenebildiği gibi; mevcut işler için gerekli araç sayısına da karar verilebilmektedir.

Dağıtım ve toplama işlemlerini gerektiren bu taşıma işlemlerinin odağında Araç Rotalama Problemi (ARP) (Vehicle Routing Problem) olarak adlandırılan; izlenmesi gereken en iyi güzergâhın belirlenmeye çalışıldığı problem bulunmaktadır.

Araç rotalama problemleri temel olarak düğüm gezme ve ayrıt gezme şeklinde ikiye ayrılır. Bu ayrım tamamen müşterilerin serim üzerindeki yerleşimleriyle ilgilidir. Ama kullanılacak çözüm tekniği ve çözüm süresi açısından büyük farklılıklara neden olur. Ayrıca problemde sadece toplama veya dağıtım yapılması ile aynı anda hem toplamanın hem de dağıtımın yapılması ve müşterilere uğramada uyulması gereken bir zaman aralığının olması hali gibi farklı durumlar da olabilir. Eklenen bu özel koşullar rotalama problemlerini gerçek yaşam problemlerine daha çok yaklaştırmakta, öte yandan çözümünü de güçleştirmektedir.

Düğüm gezme veya düğüm rotalama olarak isimlendirilen problemde müşteriler serimdeki düğümler üzerinde tanımlanmıştır. Amaç, her düğümün sadece bir kez ziyaret edilmesini sağlayacak turların belirlenmesidir. Ayrıt

rotalama probleminde ise müşteriler ayrıt olarak isimlendirilen düğüm çiftleri arasında yol boyunca konumlanmışlardır. Bu problem tipinde ise tüm ayrıtların en az bir kere gezilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Her ikisini de içeren araç rotalama problemleri de genel rotalama problemi denmektedir.

Araç rotalama problemlerinde amaç fonksiyonu, genellikle maliyeti enküçükmektir. Bunun için kullanılan ölçüt ise çoğu zaman toplam mesafenin enküçüklenmesi olmaktadır. Ancak literatürde farklı amaç fonksiyonları da mevcuttur. Bunlardan bazıları en büyük gecikmeyi enküçüklemek, hizmet için gerekli araç sayısını enküçüklemek, öncelikli müşterilere öncelikli hizmet vermek, taşıma işlemi için gerekli zamanı enküçüklemek, taşımada kullanılan araçların taşıdığı malzeme ya da kişi miktarını dengelemektir.

Gerçek anlamda iki nokta arasındaki mesafeyi kat eden bir aracın maliyeti birçok değişkene bağlıdır. Bunların başlıcaları aracın yükü, harcanan yakıt, yakıt fiyatı, lastiklerin ve aracın yıpranması, bakım giderleri, sürücü ücretleri, kat edilen mesafe vb'dir. Bu parametrelerin tümü dikkate alındığında malzeme taşımakta olan araçların taşıma maliyetlerinin önemli bir miktar oluşturduğu görülmektedir. Ticari taşımacılık yapan firmaların dışında, birçok kamu kuruluşunda da ağır ulaştırma araçları ile büyük miktarlarda yük taşınması yapılmaktadır ve bu nedenle toplam maliyeti en küçükleyen modellerin bu yükleri de dikkate alarak hazırlanması giderek artan bir şekilde önem kazanmaktadır. Araçlar toplam ağırlıklarına (boş ağırlığıyla birlikte yakıt ve taşıdığı yük de dâhil olmak üzere) göre 8 sınıfa ayrılmışlardır (Bektaş ve Laporte, 2011). Bu sınıflardan en hafifi yaklaşık 3 tona karşılık gelirken en ağır sınıf ise 15 tondan fazla gelmektedir.

Bu yöndeki çalışmalardan biri 2007'de Kara ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Birikimli Araç Rotalama adı verilen ve harcanan enerjiyi enküçükleyen araç rotalama problemi tanıtılmıştır. Yük ve yükle kat edilen mesafenin çarpımının hesaba katıldığı ağırlıklı bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. İzleyen yıllarda Bektaş ve Laporte, toplam CO₂ salınım miktarını, dolayısıyla yakıt tüketimini enküçükleyen modellerini tanıtmışlar ve modelleriyle aracın teknik özelliklerini, yükünü, hızını ve diğer değişkenleri

dikkate alan bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Kirlilik Rotalama olarak adlandırdıkları modelleri ile CO₂ salımı miktarını enküçükleyerek çevreyi de dikkate almışlardır. Bu çalışma, son yıllarda Yeşil Lojistik (Green Logistics) olarak da bilinen, verimlilik ve ekonomiklik – sosyal yaşama saygı ve güvenlik – çevre sorunlarına duyarlılık dengesini dikkate alan yaklaşıma paralel bir düşünce içermektedir. Yazarlar bu çalışmalarında geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak amaç fonksiyonunda değişiklik yapmışlardır.

Ağır malzemelerin taşınması işi özellikle mühimmat, motor parçaları gibi malzemelerin taşınmasında ortaya çıkmaktadır. Silahlı Kuvvetlerde de özellikle barış zamanında arızlanan veya daha yeni bir modelle güncellenmesi gereken motor, motor parçalarının, mühimmat ve silah sistemlerinin taşınmasında ağır malzeme taşımacılığı yapılmaktadır. Güvenlik nedenleriyle bu malzemeler ancak karayolu taşımacılığı ile taşınabilmektedir. Öte yandan malzemelerin ağır olması yolun durumuna da bağlı olarak araçların ciddi şekilde sera gazı salınımına neden olabilmektedir. Üstelik problem sadece bir malzemenin taşınması değil, ömrünü tamamlayan malzemelerin de geri getirilmesi olduğu için hem taşıma hem de toplamayı gerektirmektedir. Doğal olarak elde farklı özelliklerde araçlar vardır. Bu durumda SGS'nı enküçük yapacak şekilde hangi aracın hangi rotayı izlemesi ve dağıtım ile toplamayı nasıl yapmaları gerektiğinin belirlenmesi ciddi bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada toplam harcanan yakıt miktarının ve dolayısıyla SGS'nın enküçüklendiği ağır malzeme taşıma problemi için en iyi güzergâhın bulunmasına yönelik bir matematiksel model önerilmektedir. Bu modelde eniyi yolun bulunması için yük, hız, aracın teknik özellikleri gibi değişken ve parametreler kullanılarak gerçek hayat problemlerine uygun bir yapı geliştirilmiştir. Model ayrıca hem taşıma hem de toplama için gerekli olan rotaları aynı anda türetmekte, böylece bütünsel eniyiyi sağlayacak şekilde bütün araçlar için bir dağıtım, bir de toplama rotası belirlemektedir. Bunun yanı sıra araçların açık rota izleyebilmelerine de olanak sağlanmıştır. Modelin önemli bir özelliği de problemin heterojen filonun olması hali için çözüm verebilmesidir. Geliştirilen model, klasik araç rotalama problemleri için önerilen test problemleri üzerinde denenmiş, 20 düğümlü 5 araçlı bir

problemin eniyi çözümü yaklaşık 1515 dakikada (25,2 saat), 18 düğümlü 6 araçlı bir problemin eniyi çözümü ise yaklaşık 3382 dakikada (56,3 saat) GAMS IDE 23.7 yazılımı ve CPLEX MIP (mixed integer programming) çözücüsü ile bulunmuştur.

Söz konusu çalışmanın yazım planı izleyen şekilde tasarlanmıştır. Birinci bölümde araç rotalama problemi ve araç rotalama probleminin türleri tanıtılmıştır. Ağır malzeme taşıma problemi, birikimli araç rotalama ve kirlilik rotalama problemleri ile ilgili bilgiler ikinci bölümde verilmiştir. Üçüncü bölümde açık turlu kirliliği enküçükleyen araç rotalama problemi için önerilen model detaylı olarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde incelenen test problemleri tanıtılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek, önerilerde bulunulmuştur.

BİRİNCİ BÖLÜM

ROTALAMA PROBLEMLERİ

Genel olarak bilinen ismi ile Rotalama Problemi bir veya daha fazla depoda konumlandırılmış bir veya daha fazla aracın, çeşitli bölgelerin (düğüm, ayrit) ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde, çeşitli kısıtlar (araç kapasitesi, zaman penceresi vb.) altında bir amacı (kat edilen toplam yol uzunluğunun enküçüklenmesi, bir rotadaki en uzun ayritin enküçüklenmesi vb.) eniyileyecek şekilde araç turlarının belirlenmesi problemidir. Literatürde bu problemlere Araç Çizelgeleme Problemi de denmektedir. Burada karşılanacak ihtiyaç, talep edilen son ürünlerin düğüm ya da ayritlara ulaştırılması olabildiği gibi; bu bölgelerden bazı malzeme ya da son ürünlerin toplanması da olabilmektedir (Toth ve Vigo, 2001).

Günümüzdeki gerçek hayat uygulamalarında sıkça karşımıza çıkan rotalama problemleri sadece dağıtım ve toplama işlevi ile sınırlı değildir. Bu problemin kullanıldığı diğer uygulama alanlarından bazıları katı atık toplama, sokak temizlikleri, okul servis güzergâhlarının belirlenmesi vb. dir.

Rotalama problemleri, literatürde düğüm rotalama ve ayrit rotalama olmak üzere iki ana başlık altına incelenmektedirler. İzleyen alt bölümlerde rotalama problemlerine ilişkin bazı gösterim ve tanımlamalar aktarılmış, devamında düğüm rotalama ve ayrit rotalama problemlerine yer verilmiştir.

1. ROTALAMA PROBLEMLERİNDE BAZI TANIMLAMALAR VE GÖSTERİMLER

Rotalama problemleri; bir serim üzerinde tanımlanırlar ve gösterilirler. Bir serim (network, graph) ise $G=(V, E)$ ile gösterilir. Bu ifadedeki V düğümler (nodes, vertices) kümesini, E ise ayrıtlar kümesini temsil etmektedir. Bir başka ifadeyle bir serim düğümler ve ayrıtlardan oluşmaktadır. Bu şekilde tanımlanmış bir serimde düğümler noktaları, ayrıtlar düğümleri birbirine bağlayan doğrultu ya da yolları ifade etmektedir. Örneğin bir yol şebekesindeki kavşaklar, önemli noktalar, yerleşim birimleri, depolar, metro istasyonları düğümler olarak, sulama kanalları, metro hatları, caddeler, sokaklar, telefon hatları ise ayrıtlar olarak görülebilir. Serimde yer alan bu ayrıtların her birinin maliyeti veya uzunluğu belirli büyüklükteki birimler ile ifade edilebilecek şekilde tanımlanmış ise serim ağırlıklandırılmış (weighted) serim, böyle bir durum mevcut değil ise ağırlıklandırılmamış (unweighted) serim olarak adlandırılmaktadır (Ahuja ve diğerleri, 1993).

Yukarıda bahsedilen ağırlıklar bir maliyet ya da mesafe matrisi yardımıyla gösterilebilmektedir. Bu matris genellikle D ile gösterilir. $\forall (i,j) \in \{E,A\}$ ve $i \neq j$ olmak üzere (i,j) ayrıtının maliyeti d_{ij} olarak gösterilebilir. Servis bölgelerinin (düğüm ya da ayrıt) talep değerleri ise servis verilecek bölge bir $i \in V$ düğümü ise q_i , ilgili bölge bir $(i,j) \in (E, A)$ ve $i \neq j$ ayrıtı ise q_{ij} şeklinde ifade edilebilir.

Ayrıtlar, yönlü veya yönsüz olabilirler. Bir serimde birbirinden farklı herhangi i ve j düğümlerini birleştiren ayrıt (i,j) şeklinde gösterilmektedir. (i,j) ayrıtındaki akış hem i 'den j 'ye hem de j 'den i 'ye çift yönlü olarak gerçekleştirilebiliyorsa, (i,j) yönsüz bir ayrıttır ve $(i,j) \in E$ olarak tanımlanır. Buna bağlı olarak bu serimdeki düğümler arasındaki uzaklıkları gösteren matris de simetrik matris olarak isimlendirilir. Bir başka deyişle D matrisi simetriklik özelliği gösterir ise $\forall i,j \in V$ ve $i \neq j$ olmak üzere $d_{ij}=d_{ji}$ olur. Eğer böyle bir durum söz konusu değil ve akış örnek olarak sadece i 'den j 'ye tek yönlü olarak mümkünse, o zaman (i,j) yönlü bir ayrıttır ve bu durumda serimimiz $G=(V, A)$ ile gösterilir, $(i,j) \in A$ şeklinde tanımlanır ve bu serimdeki düğümler arası uzaklıkları gösteren matris asimetrik olarak isimlendirilir.

Bir serimdeki tüm ayrıtlar yönsüz ise bu serim yönsüz (undirected), tüm ayrıtlar yönlü ise yönlü (directed) olarak adlandırılmaktadır. Eğer ayrıtların bir kısmı yönlü bir kısmı da yönsüz ise bu serime karma serim (mixed graph) denilmektedir. Tam bağlı (complete) serimlerde tüm düğümler kendisi haricindeki tüm düğümlere bağlıdır. Eğer herhangi bir düğüm, kendisi haricindeki tüm düğümlere bağlı değil ise bu serime de seyrek (sparse) serim denilmektedir. Böyle bir durumda birbirinden farklı herhangi i ve j düğümlerini bağlayan bir ayrıt yok ise bu ayrıtın maliyeti D matrisinde $d_{ij}=M$ (çok büyük bir sayı) olarak gösterilebilir. Bir serimi oluşturan bütün düğümlerden diğerlerine en az bir yol ile ulaşılamıyorsa bu serime kopuk (disconnected) serim denir.

Rotalanacak araçların sahip oldukları özelliklerin aynı ya da farklı olması, bir diğer sınıflama tanımını beraberinde getirmektedir. Aynı özelliklere sahip araçlardan oluşan filo homojen filo (homogeneous fleet), farklı özelliklere sahip araçlardan oluşan filo heterojen filo (heterogenous fleet) denilmektedir. Filodaki i . Aracın kapasitesi Q_i olarak gösterilmektedir.

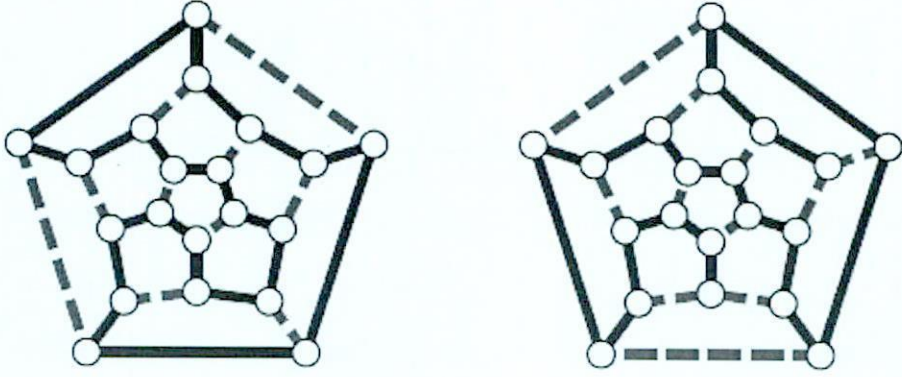
Depo (depot) düğümü ya da düğümleri; filonun başlangıçta konumlandırıldığı düğüm ya da düğümlerdir. Tek depolu bir serimde genellikle 0 veya 1 ile gösterilmektedir.

Bir düğümün derecesini, kendisine komşu (adjacent) olan ayrıtların sayısı vermektedir. Bir serimde $i, j \in V, i \neq j$ olmak üzere, eğer $i-j$ düğümlerini birleştiren bir $(i,j) \in (A, E)$ ayrıtı var ise (i,j) ayrıtı i ve j düğümlerine komşudur (adjacent) (Larsen ve Clausen, 2009). Bu değer tek ise düğüme tek dereceli düğüm (odd vertex), çift ise çift dereceli düğüm (even vertex) ismi verilmektedir.

2. DÜĞÜM ROTALAMA PROBLEMLERİ

Servis verilecek yerlerin serimlerdeki ayrıtların kesişim noktalarında, yani düğümlerde tanımlandığı problemler Düğüm Rotalama Problemleridir. Amaç araç ya da araçların turlarının belirlenmesidir. İlk olarak 1857 yılında William Rowan Hamilton tarafından bulunan *Icosian Game* isimli matematiksel oyun ile düğüm rotalama problemleri başlamıştır. Bu oyun, düzgün bir on iki yüzlünün (dodecahedron) herhangi bir noktasından

başlanarak, tüm düğümlere sadece bir kez uğranıp, düğüm tekrarı yapmadan başlangıç düğüme dönen bir tur bulunması oyunudur. Bu oyundan esinlenilerek söz konusu tura *Hamiltonian tur problemi* denilmiştir. Şekil-1'de düzgün bir on iki yüzlü üzerinde bir Hamilton turu ve Hamilton Yolu örneği verilmiştir.



Şekil-1: a) Hamilton Turu

b) Hamilton Yolu (Path)

(Mathematica-journal, 2012)

Bir serimde ardışık olarak sıralanan düğümler ve ayrıtlar dizisi yürüyüş (walk) olarak adlandırılır. $I=\{0,1,...,n\}$, $k=\{0,1,...,(n-1)\}$, $i \in V$ ve $ek \in (E, A)$ olmak üzere, $v_0, e_0, v_1, e_1, v_2, e_2, ..., v_{n-1}, e_{n-1}$ dizisi bir yürüyüşe örnektir. Başlangıç ve bitiş düğümleri aynı ise buna kapalı yürüyüş (closed walk) denir. Yürüyüşteki herhangi bir düğümün tekrarlanmadığı duruma yol (path) denilmektedir. Başladığı düğümde biten yol, çevrim (cycle) olarak adlandırılmaktadır. Herhangi bir ayrıtların tekrarlanmadığı yürüyüşe tur (tour, trail) denilir (Gross ve Yellen, 2004).

Gezgin Satıcı Problemi (GSP); bir Hamilton turu bulma probleminden türeyen ve en çok bilinen düğüm rotalama problemidir. GSP' de amaç, bir serimde herhangi bir düğümden başlanıp, hiçbir düğümü tekrarlamadan, mümkün olan en düşük maliyetle tüm düğümlerin kapsandığı ve başlangıç düğüme döndüğü bir turun belirlenmesidir. Serim yönlü, yönsüz veya karma yapıda olabilir. Buna bağlı olarak düğümler arasındaki uzaklıkları gösteren uzaklıklar matrisi simetrik veya asimetrik olabilir.

GSP'den türeyen diğer problemlerden bir tanesi *m*-Gezgin Satıcı Problemi (*m*-GSP) (*m*-Travelling Salesman Problem)'dir. Bu problemde *m* adet sınırsız kapasiteli olduğu varsayılan araç (veya gezgin) için *m* farklı tur belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu problem tipinde de GSP'de olduğu gibi, serim yönlü, yönsüz veya karma olabilir. GSP ve türevlerini içeren kapsamlı bir çalışma Gutin ve Punnen (2004) tarafından yapılmıştır.

Literatürde yaygın olarak çalışılmış bir diğer düğüm rotalama problemi ise kombinatoriyel problemlerden biri olan Kapasiteli Araç Rotalama Problemi'dir (KARP) (Capacitated Vehicle Routing Problem) (Toth ve Vigo, 2001). Bu problemde yönsüz bir serimde bulunan *m* adet sınırlı kapasiteli araç, başlangıçta depo olarak tanımlanmış bir düğüm üzerinde konumlandırılmıştır. Araçlara yüklenen toplam talep miktarı araç kapasitesini aşamaz. Amaç, serimdeki tüm düğümlerin taleplerini sadece bir kere uğrayarak karşılayıp, düğüm tekrarı yapılmadan mümkün olan en düşük maliyetle depoya dönülen turların belirlenmesidir.

KARP'nin de pek çok alt türü tanımlanmıştır. Aşağıda sıkça karşılaşılan türleri kısaca verilmiştir.

Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi (ZPARP) (Vehicle Routing Problem With Time Windows): Depodan hareket eden araçların müşterilere belli zaman penceresi (aralığı) içinde hizmet verme zorunluluğu olan (zaman penceresi kısıtı) özel bir araç rotalama problemi türüdür. Okul servisi rotalama, posta, gazete dağıtımı, akaryakıt dağıtımı, güvenlik devriyesi kontrolleri, kentsel atık toplama gibi gerçek hayat problemleri örnek olarak verilebilir (Ioannou ve Kritikos, 2004).

Çok Depolu Araç Rotalama Problemi (ÇDARP) (Multiple Depot Vehicle Routing Problem): Düğüm taleplerinin tek bir depo yerine birden fazla depo ile karşılandığı problemidir. Bu problemde araçların yola çıktıkları depoya dönme zorunluluğu kaldırılırsa, açık rotalı problem türü ortaya çıkar (Cordeau ve diğerleri, 1997).

Olasılıklı Araç Rotalama Problemi (OARP) (Probabilistic Vehicle Routing Problem): Talebin veya uğranacak düğümlerin varlığının olasılıklı olması

halidir. Banka şubelerinden hafta sonu toplanacak para miktarının olasılıklı olması ile uğranacak müşterilerin yerlerinin sonradan belli olması (örneğin arıza isteklelrinin gelmesi gibi) buna bir örnek olarak verilebilir.

Kısmi Teslimatlı Araç Rotalama Problemi (KTARP) (Split Delivery Vehicle Routing Problem): Düğümlemlerin taleplerinin birden fazla araçla karşılanabilir olduğu, yani talebin alt parçalara bölünebildiği durumdur. Bu durumda her düğüme birden fazla araç uğrayabilir ve birbiriyle kesişebilen rotalar ortaya çıkar.

Dağıtımli-Toplamalı Araç Rotalama Problemi (DTARP) (Vehicle Routing Problem With Pickup and Delivery): Düğüm taleplerinin (dağıtım ve toplama) eşzamanlı karşılanması gereken problemdir. Bir noktaya ürünün dolu kasasını bırakıp boş kasayı alması örnek olabileceği gibi geri taşınması gereken iade ürünler veya arızalı ürünlerin olması da bu gruba girer.

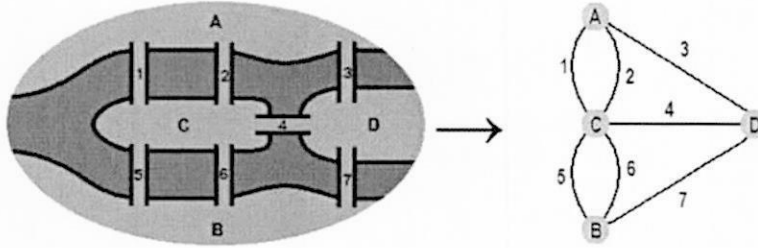
Dönemlik Araç Rotalama Problemi (DARP) (Periodic Vehicle Routing Problem): Periyodik Araç Rotalama Problemi (PARP), planlama periyodunu M güne çıkararak klasik ARP'nin genelleştirilmiş halidir. M – gün periyodunda, her müşteri belirtilen periyotta en az bir kere ziyaret edilmek zorundadır (Drummond ve diğerleri, 2001). Büyük otellere düzenli olarak et, sebze gibi ürünlerin taşınması buna örnek olarak verilebilir.

Geri Toplamalı Araç Rotalama Problemi (GTARP) (Vehicle Routing Problem With Backhauls): Müşterilere dağıtım yapıldıktan sonra, bazı müşterilerden toplama yapılması (tekrar uğranması) gereken problemdir.

Yukarıda tanımlanan KARP türlerinin tamamında amaç fonksiyonu, araçların tur uzunlukları toplamının enküçülenmesi şeklinde tanımlanmıştır. Ama farklı amaç fonksiyonlarının tanımlandığı başka araç rotalama problemleri de vardır.

3. AYRIT ROTALAMA PROBLEMLERİ

Bir serimdeki bütün ayrıtlardan en az bir kez geçip başlangıç düğüme en küçük maliyetle dönülmesi problemi, ayrıt rotalama problemidir. Bu problem literatüre ilk kez Leonard Euler tarafından 1735'de Königsberg köprüleri problemi ile tanımlanmıştır (Euler, 1736; Gribkovskaia ve diğerleri, 2007). Euler, ilk kez serim kavramını Königsberg köprüleri problemini serim biçiminde tanımlayarak ortaya atmış, ayrıca literatüre Euler Turu (Eulerian Tour) kavramını kazandırmıştır. Buradaki problem Königsberg şehrinde bulunan yedi adet köprüden sadece bir kez geçilip başlangıç yerine dönme problemidir. Serimdeki her ayrıttan sadece bir kez geçilerek başlangıç noktasına dönülmesi ile oluşan tur, Euler turudur. Euler, yönsüz bir serimde ancak tüm düğümlerin çift dereceli olması durumunda bir Euler turu olabileceğini de ispatlamıştır. Königsberg köprüleri (a) ve karşı gelen serim (b) Şekil-2'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi bu serimdeki tüm düğümler tek derecelidir ve bu nedenle bu serimde bir Euler turu olamaz.



Şekil-2: a) Königsberg Köprüleri-1736, **b)** Königsberg Köprüleri'nin Serim Gösterimi (Wikipedia, 2012).

Ayrıt rotalama problemlerinde de Euler turu probleminden türetilmiş çeşitli problem türleri vardır. Bunlar aşağıda kısaca verilmiştir.

Çinli Postacı Problemi (ÇPP) (Chinese Postman Problem) Euler turu probleminden sonra en çok tanınan ayrıt rotalama problemidir. ÇPP'de amaç, serimdeki tüm ayrıtlardan en az bir kez geçilerek başlangıç düğüme dönecek en küçük maliyetli turun belirlenmesidir. İlk kez 1962 yılında Çinli bir matematikçi olan Mei-Ko Kwan tarafından önerilmiştir. ÇPP, Edmonds ve Johnson (1973) ve Eiselt'e (2000) göre serim yönlü veya yönsüz olsa da

polinom zamanda çözülebilmektedir. Ancak serim karma ise problem NP-zor olmakta ve polinom zamanda problemi çözebilen bir algoritma bilinmemektedir (Papadimitriou, 1976).

Rüzgârlı Çinli Postacı Problemi (RÇPP) (Windy CPP): $(i,j) \in E$ ve $d_{ij} \neq d_{ji}$ durumu Rüzgârlı Çinli Postacı Problemi'ni tariflemektedir. Yani serimin yönlü olması ve ayrıtların üzerindeki akış yönüne bağlı olarak maliyetin değişmesi halidir. Örneğin aynı özellik ve ağırlıktaki iki araçtan, yokuş tırmanan araç daha fazla yakıt tüketirken, yokuş inen ise daha az yakıt tüketir. Bu nedenle bu probleme göre, serim üzerindeki ayrıtlar akış yönüne göre farklı maliyetle ele alınırlar.

Hiyerarşik Çinli Postacı Problemi (HÇPP) (Hierarchial CPP): Gezilmesi gereken ayrıtların birbirlerine göre önceliğinin olduğu ÇPP türüdür (Eiselt ve diğerleri, 2000). Özellikle problemde öncelikli müşterilerin olması halinde ortaya çıkar.

Kırsal Postacı Problemi (KPP) (Rural Postman Problem): KPP, 1974 yılında Orlof tarafından önerilmiştir. Serimdeki tüm ayrıtlar yerine, ayrıtların bir alt kümesinin gezilme zorunluluğunun olduğu durumdur. Bir başka ifadeyle KPP, bir serimdeki ayrıtların verilen bir alt kümesini kapsayan en küçük maliyetli turun bulunması problemidir. Müşterilerin serimdeki bazı ayrıtlar üzerinde konumlanmış olması hali buna bir örnektir. Lenstra ve Rinnooy Kan (1976) tarafından problemin NP-zor olduğu gösterilmiştir. KPP'nin uygulama alanları ve çözüm yaklaşımlarına, Eiselt ve diğerleri (2000)'nin çalışmalarında ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Kapasiteli Ayrıt Rotalama Problemi (KARP) (Capacitated Arc Routing Problem-CARP): Problemde birden fazla sınırlı kapasiteli aracın olduğu durumda ortaya çıkan ayrıt rotalama problemidir. En zor rotalama problemlerinden biridir. Bazı problemlerde hem düğüm, hem de ayrıt rotalama gerekebilmektedir. Bu tür problemler, Genel Rotalama Problemi (GRP) (General Routing Problem) olarak adlandırılmaktadır. GRP, verilen bir $G=(V, E, A)$ seriminde tanımlı olan hizmet verilmesi gereken tüm ayrıtlara ve düğümlere en az bir kez uğranarak, en küçük maliyetli turun belirlenmesi

problemidir. Literatüre ilk olarak 1974 yılında Orloff tarafından tanıtılmıştır. GRP, $V=\emptyset$ durumunda ayrıt rotalama problemine dönüşmektedir. Bu sebeple NP-zor sınıfında yer almaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

ARAÇ ROTALAMAYLA İLGİLİ YENİ PROBLEMLER

Gerçek anlamda iki nokta arasındaki mesafeyi kat eden bir aracın maliyeti birçok değişkene bağlıdır. Bunların başlıcaları aracın yükü, harcanan yakıt, yakıt fiyatı, lastiklerin ve aracın yıpranma payı, bakım giderleri, sürücü ücretleri, kat edilen mesafe vb. dir. Bu parametrelerin tümü dikkate alındığında malzeme taşımakta olan araçlar için taşıma maliyetinin önemli bir miktar oluşturduğu görülmektedir. Ticari taşımacılık yapan firmaların dışında, birçok kamu kuruluşunda da ağır ulaştırma araçları ile büyük miktarlarda yük taşınması yapılmaktadır ve bu nedenle toplam en kısa yolun belirlenmesi yerine toplam maliyeti en küçükleyen modellerin dikkate alınması giderek artan bir şekilde önem kazanmaktadır.

İzleyen alt bölümlerde Ağır Malzeme Taşıma Problemi ile ilgili bilgiler verilmiş, bu problemin çözümünün ele alındığı Birikimli Araç Rotalama ve Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemleri tanıtılmış ve günümüzde önemli çalışmaların yapıldığı, kaynakların tahsis edildiği Yeşil Lojistik konusuna yer verilmiştir.

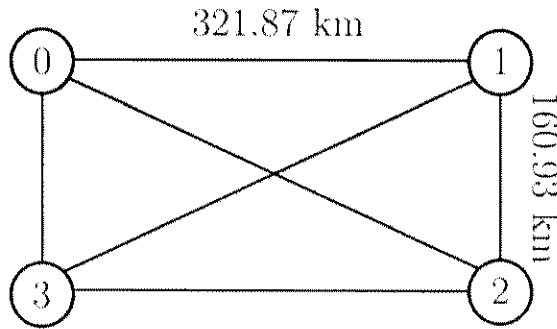
1. AĞIR MALZEME TAŞIMA PROBLEMİ

Araçlar toplam ağırlıklarına (boş ağırlığıyla birlikte yakıt ve taşıdığı yük de dâhil olmak üzere) göre 8 sınıfa ayrılmışlardır. Bu sınıflardan en hafifi yaklaşık 3 tona karşılık gelirken en ağır sınıf ise 15 tondan fazla gelmektedir. 1, 2 ve 3 üncü sınıfa giren araçlarla yapılan taşımacılığa Hafif taşımacılık; 4, 5 ve 6 ncı sınıflardaki araçlar ile yapılan taşımacılığa ise Orta taşımacılık denilmektedir. Son iki sınıf olan 7 ve 8 inci sınıf araçlarla yapılan taşımacılığa ise Ağır Taşımacılık denilmektedir (Bektaş ve Laporte, 2011).

Özellikle bu son iki sınıftaki araçlarla yapılan Ağır Malzeme Taşıma Problemlerinde eniyi turun bulunması için farklı modeller önerilmiştir. Ağır malzeme taşımacılığı birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır. Ağır malzeme taşınmasına örnek olarak inşaat malzemelerinin nakli, hafriyat taşımacılığı,

ağır iş makinelerinin çalışma bölgelerine taşınması, yollarda ilerlemesi uygun olmayan (örneğin paletli) iş veya savaş araçlarının taşınması, askeri mühimmat veya teçhizatın taşınması sayılabilir.

Araç üzerindeki yük miktarının harcanan enerji miktarında sebep olabileceği değişikliği bir örnek ile göstermek için Şekil-3' teki serim kullanılmıştır. Serim düzgün bir dikdörtgen şeklindedir ve karşılıklı kenar uzunlukları birbirine eşittir.



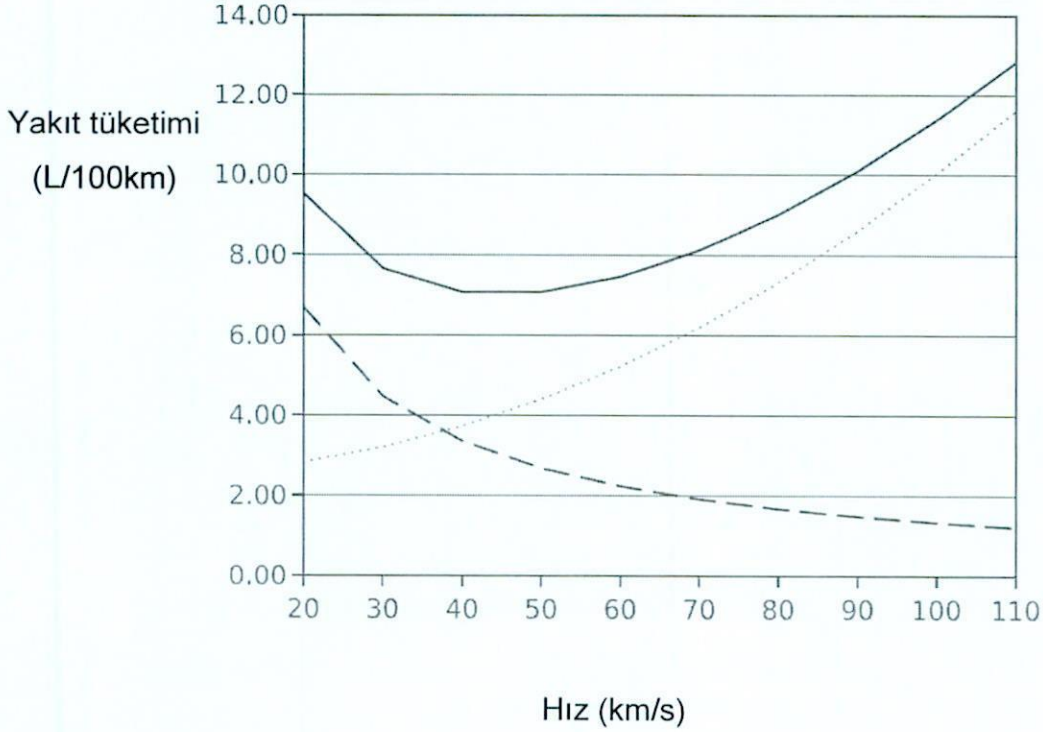
Şekil-3: Örnek Serim

(Bektaş ve Laporte, 2011)

Bu serimde 0 düğümünün depo; 1,2 ve 3 numaralı düğümlerin de talepleri 1000 kg olan müşteriler olduğu varsayılmıştır. Kapasitesi 3000 kg olan bir adet aracın uygun turu depodan başlayacak ve yine depoda sonlanacaktır. Bu şekilde kat edilen mesafeyi en küçükleyecek iki en iyi tur bulunmaktadır: 0-1-2-3-0 ve 0-3-2-1-0. Her iki turun da toplam mesafesi 965,61 km'dir ve en kısa tur uzunluğunu veren eniyi çözümdür. Ancak, bu turlar harcanan enerji yönünden incelendiğinde sonuçlar farklı olmaktadır. Üçüncü bölümde açıklanacak modelde yer alan parametrelerin ve yakıt tüketimi fonksiyonun kullanılması ile 0-1-2-3-0 turu için harcanacak enerji 192,56 kWh iken 0-3-2-1-0 turu için bu değer 183,79 kWh'tir. Aradaki fark %4,55 kadardır (Bektaş ve Laporte, 2011). Toplam kat edilen mesafe aynı olmasına karşın, ikinci turda araç tam dolu iken ilk müşteriye kadar kat edilen mesafe daha kısa, en son düğüm ile depo arasında aracın yük taşımadan kat ettiği mesafe daha uzun olduğundan yakıt tüketiminde fark oluşmaktadır. Bu örnek yakıt tüketimi ve harcanan enerji miktarının tur uzunluğuna göre değil

taşınan yük miktarına bağlı olarak nasıl değişebileceğine, dolayısıyla en kısa turu bulmak ile en az enerji harcamayı gerektirecek turu bulmanın farklı şeyler olduğuna dair iyi bir örnektir.

Araçların üzerindeki yük miktarına ek olarak, kat ettikleri mesafeyi hangi hızda gidecekleri de, harcanan yakıt miktarını etkileyen önemli unsurlardandır. Hızın yakıt tüketimine olan etkisi, Şekil-4'de verilmiştir.



Şekil-4: Hızın Bir Fonksiyonu Olarak Yakıt Tüketimi

(Barth ve diğerleri,2009)

Şekil 4'de kesik çizgi ve noktalı çizgi ile gösterilen iki faktörün etkisi (motorun karakteristik özellikleri ve aracın ihtiyacı olan çekiş gücü) sonucu bir aracın belirli bir hızda gitmek için harcayacağı yakıt miktarı en üstte yer alan düz çizgi ile gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi araçların ayarlar üzerinde yol alırken seyahat edecekleri hız seviyesi, harcanan yakıt miktarını doğrudan etkilemektedir (Barth ve diğerleri,2009).

Hız faktörünün etkisini arttıran bir diğer faktör de zaman penceresi kısıtlarının mevcut olup olmama durumudur. Eğer zaman penceresi kısıtları mevcut ise hızın bir değişken olarak etkisi daha da artmakta ve zaman

aralıklarının darlığı ve genişliğine göre harcanan enerji miktarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Yukarıda belirtilen faktörlerin etkilerinin, ağır malzeme taşımacılığında daha da belirgin hale gelmesinden dolayı son yıllardaki çalışmaların özellikle harcanan enerji miktarını, salınan gaz miktarını ve dolayısıyla maliyeti en küçükleyen modeller üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Benzer bir etkiyle kara yollarına ek olarak demir yollarının da kullanılabilirliğinin artırılması, taşıma kapasitesinin artırılması ve ömrünün uzatılması gibi konularda yapılan çalışmaların sayısı da gittikçe artmaktadır (Kalay, 2009).

2. BİRİKİMLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Araç rotalama problemlerinde harcanan enerjiyi dikkate alan çalışmalar incelendiğinde, son yıllarda literatürde Birikimli Araç Rotalama Problemi (BARP) adı ile yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan bu çalışmaların başlıca iki ana grupta toplanabileceği görülmektedir.

Bunlardan birincisi, klasik ARP kısıtlarının sağlandığı ve amaç fonksiyonu olarak tüm düğümlere ulaşma süreleri toplamının enküçüklendiği birikimli araç rotalama problemidir. Bu problemde tüm araçların düğümlere ulaşma zamanlarının toplamı enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Bu toplamın birikimli olarak artış göstermesi nedeniyle problem bu şekilde isimlendirilmiştir. BARP ile ilk olarak Ngueveu ve diğerleri (2010) çalışmışlardır. BARP; Gezgin Tamirci Probleminin (GTP) (Traveler Repairman Problem-TRP) (Salehipour ve diğerleri, 2008) genelleştirilmiş halidir (Ngueveu ve diğerleri, 2010). GTP, literatürde Enküçük Gecikme Problemi (Minimum Latency Problem) olarak da bilinmektedir.

BARP, gerçek hayatta iş-makine çizelgeleme uygulamalarının yanı sıra, özellikle müşteri tatminine öncelik verildiği durumlarda ya da doğal felaketler sonrası hayati ihtiyaç ve ilk yardım malzemelerinin dağıtımında önem kazanmaktadır. Ngueveu ve diğerleri (2010) ne göre BARP ile enk-enb ARP oldukça farklı problemlerdir. BARP'de tüm düğümlere ulaşma süreleri

toplamlı, enk-enb ARP'de ise herhangi bir düğüme enbüyük ulaşma süresi dikkate alınmaktadır. Böylece özellikle afet lojistiği gibi hayati konularda gerçek yaşam problemlerine daha uygun bir model elde edilmektedir.

Gerçek yaşam problemlerine uyumun daha da iyileştirilmesi için yazarlar çalışmalarında klasik ARP yerine açık ARP'ni ve BARP yerine Birikimli Açık Araç Rotalama Problemi (BAARP) problemlerini kullanmışlardır. Bu modeller doğal afet sonrası yardım lojistiği konularına daha uygundur çünkü en son ulaşılabacak nokta önem kazanmakta, depoya dönüş ilk aşamalarda önem arz etmemektedir (Ngueveu ve diğerleri, 2010).

BARP'nin ikinci türü ise, araçta bulunan mevcut yük miktarına bağlı olarak değişen yakıt tüketim miktarının da hesaba katıldığı ve yine klasik ARP kısıtlarının sağlanıp toplam tur maliyetinin enküçüklendiği problemleri kapsamaktadır. Literatürde bu ana başlık altında yapılmış çalışmaları da kendi arasında iki alt gruba ayırmak mümkündür.

Birinci alt gruptaki çalışmalarda araçların değişik ortamlarda (hava ve yol koşulları, farklı sürücüler, farklı yük miktarı, trafik yoğunluğu vb.) yakıt tüketim miktarları çeşitli deneyler ile ölçülmektedir. Bu deneylerde ağırlıklı olarak araçların egzoz çıkışlarında salınımı yapılan CO₂ miktarını ölçen cihazlar kullanılmaktadır. Bu çalışmalar daha çok makine mühendisliği ile endüstri mühendisliği çalışma alanıyla ilişkilidir. Bu konudaki ilk çalışmalar, erişilebildiği kadarıyla Rees'e aittir (2004).

Rees (2004), sadece yatay eksen uzaklığını değil, eğim sebebiyle oluşan engebeli arazi koşullarını da yakıt tüketiminde hesaba katan yeni bir model ile birlikte anlık olarak bilgilerin işlenmesi ve modelin çözülmesi için bir yöntem önermiştir. Bu model düğümler arasındaki fiziki mesafeyi önerdiği teknik ile yeniden hesaplayıp, bu verilere Dijkstra (1959) algoritmasını uygulamaktadır.

Tavares ve diğerleri (2009), aracın ağırlığı ve yolların eğimini de dikkate alan bir üç boyutlu coğrafi bilgi sistemi (3D-GIS) geliştirmişler ve bu bilgiler ışığında atık toplama yönetimi konusunu ele almışlar ve uğranılması gereken noktalar için araç güzergâhlarını belirlemişlerdir. Yazarlar bu

alışmalarını Yeşil Burun Adaları'nın başkenti olan Praira ve Santiago Adası olmak üzere iki farklı bölgede uygulamışlar, sonuçta kat edilen mesafe %1,8 artarken, yakıt tüketiminde %12'lere ulaşan bir azalma elde etmişlerdir.

Yong ve Xiaofeng (2009), klasik ARP ile BARP arasındaki farkı ele alan bir çalışma yapmışlardır. Küçük boyutlu ($n=7$) bir problem üzerinde bile, bu iki problemin matematiksel modelleri ile elde edilen önemli farklılıklar oluşabileceğini vurgulamışlardır. Bu çalışmalarında bu farklılıklara ek olarak toplam tur uzunluğu ve yakıt tüketiminin eniyilenmesi konusunun aynı anda iki amaçlı olarak ele alınması fikrini ortaya atmışlar, bu sayede CO₂ salınımı azaltılması ile hava kirliliği ve sera etkisi üzerinde olumlu etkileri olacağını belirtmişlerdir.

Tsang ve diğerleri (2011), aracın üzerindeki yükünü dikkate almadan, farklı yol koşullarındaki birim yakıt tüketim miktarını araştırmışlardır. Bunun için Hong Kong'da mevcut olarak kullanılan dört farklı rota (şehir içi, şehirlerarası, karışık ve dağlık) üzerinde araştırma yapılmıştır. Aynı tipteki aynı araçlar, aynı sürücü tarafından bu ortamlarda sürülmüştür. Buna göre ortalama birim yakıt tüketim miktarı en yüksek olarak dağlık rotada hesaplanmış, onu şehir içi rotası takip etmiştir. Bu rotaları sırasıyla karışık ve şehirlerarası rotalar takip etmektedir.

Demir ve diğerleri (2011), yakıt tüketimi konusundaki daha önce önerilmiş farklı modelleri inceleyip karşılaştırmalı analiz yapmışlardır. Bu modeller sırasıyla, anlık yakıt tüketimi modeli (instantaneous fuel consumption model) (Bowyer ve diğerleri, 1985), 4-modlu temel yakıt tüketim modeli (four-mode elemental fuel consumption model) (Akçelik, 1982), seyir hızı yakıt tüketim modeli (running speed fuel consumption model) (Bowyer, 1985), toplu biçimli tüketim modeli (comprehensive modal emission model) (Barth ve diğerleri, 2000), (Barth and Boriboonomsin, 2008), ulaştırma salınım ve enerji tüketimi yöntemi (methodology for calculating transportation emissions and energy consumption) (Hickman, 1999) ve karayolu taşımacılığında salınım hesaplayıcı bilgisayar programı (Computer programme to Calculate Emissions From Road Transportation) (Ntziachristos ve Samaras, 2000) izlemektedir. Sonuç olarak, yol eğiminin, araç

büyükluğunun ve ağırlığının ve seyir hızının yakıt tüketimine ciddi etkileri olduğu gözlemlenmiş ve sözü edilen bu çalışmalarda gösterilmiştir.

BARP'nin ikinci türüne ait diğer başlık ise araçların faaliyet gösterdiği çevre koşulların sabit olarak ele alındığı ve sadece aracın üzerindeki yük miktarına bağlı olarak yakıt tüketiminin gerçekleştiğinin varsayıldığı çalışmalardır. Erişilebildiği kadarıyla literatürde bu konudaki ilk çalışma Kara ve diğerlerine (2007) aittir. Kara ve diğerleri (2007), Enerji Enkçüklemeli Araç Rotalama Problemi (EEARP) (Energy Minimizing Vehicle Routing Problem) adı altında konu üzerine çalışmışlardır ve toplam uzaklığın enküçüklendiği klasik ARP sonuçları ile EEARP yaklaşımında kullanılan, araç yükü ve düğümler arası uzaklık kaynaklı toplam yakıt tüketiminin enküçüklendiği sonuçları kıyaslanmıştır. Hesaplamalarda sadece araç üzerindeki yük göz önünde bulundurulmuş, diğer faktörler (hız, yolun durumu, eğim, vb.) ele alınmamıştır.

3. KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA PROBLEMİ (KERP)

Bektaş ve Laporte (2011), araç rotalama probleminde harcanan enerjiyi de dikkate alan konularda çalışmışlar ve bir matematiksel model önermişlerdir. Çalışmalarında Sera Gazları Salınımını (SGS) (Green House Gases- GHG) dikkate almışlar, bu salınımın miktarına etki eden faktörler olarak da hız, yük, aracın teknik özellikleri gibi faktörler üzerinde çalışma yapmışlardır.

Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemini (KERP) (Pollution Routing Problem), klasik ARP'nin daha geniş bir uzantısı olarak tanımlamışlar, amaç fonksiyonunu daha kapsamlı bir hale getirmişlerdir. Tanımladıkları amaç fonksiyonunda sadece kat edilen toplam mesafeyi değil; SGS miktarını, harcanan yakıt, zaman ve bunların maliyetlerini göz önüne almışlardır.

Daha önce yapılan çalışmalar, klasik amaç fonksiyonları ve ekonomik hedefler ile çevresel faktörleri (özellikle de SGS miktarını etkileyen faktörler) entegre etmede yeterli olamamaktadır. Bu çalışmaları ile yazarlar, başta yük ve hız olmak üzere, birçok faktörü göz önüne alan ve taşıma işlemi

için gerekli enerji miktarını azaltan bir yaklaşım geliştirmeye çalışmışlardır. Ayrıca çalışmalarını klasik ARP'nin bir uzantısı olarak tasarlayarak; günümüzün çeşitli problemlerinde (örneğin zaman pencere) de kolay bir şekilde kullanılmasını ve SGS miktarı ile birlikte diğer işletim maliyetlerinin de azaltılmasını sağlamayı amaçlamışlardır (Bektaş ve Laporte, 2011).

Bir ayırıt üzerinde seyahat eden bir araç için, belirli bir miktarda sera gazı salınımı olmaktadır. Bu miktar; hız, yük, eğim, araç özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bunlardan eğim ve yerçekimi gibi bazıları kontrol dışında olsa bile, araç sayısı, hız ve yük gibi bazıları da kontrol edilebilir. Araçların taşıyabilecekleri en fazla yük miktarları incelendiğinde farklı sınıf araçların farklı büyüklükte yük taşıyabildikleri görülmüştür. Ancak taşıyabildikleri yük miktarlarının aracın toplam ağırlığına (yük ve deposundaki yakıt dâhil) oranının %42, %57, %48, %51 olduğu görülmektedir. Buradan hareketle araçların yaklaşık olarak kendi ağırlıkları kadar yük taşıyabildikleri söylenebilir (Bektaş ve Laporte, 2011).

SGS miktarı genellikle gram birimi ile ölçülmektedir ve gerek harcanan enerji miktarı, gerekse yakıt maliyeti ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle gerek çevresel bir yaklaşım sergileyen, gerekse maliyet ile ilgili çalışma yapan birçok kişi bu miktarın hesaplanması ile ilgili çalışma yapmışlardır. Salınan sera gazının kendi maliyetinin yanında, çevreye olan etkilerinin de maddi bir tutara çevrilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur. Forkenbrock (2001) ve Tol (2005) bu konuda çalışma yapmışlar ve salınımı yapılan her ton CO₂ için bir maliyet miktarı ortaya koymaya çalışmışlardır. İngiltere Çevre, Gıda ve Kırsal Arazi Bölümü (DEFRA) 2007 yılında yaptığı çalışma ile bu maliyete Karbonun Gölge Fiyatı adını vermiş ve 2010 yılı için bu fiyatı her ton CO₂ için £27 olarak belirlemiş ve her geçen yıl %2 arttırmayı planlamıştır (DEFRA,2007).

Bektaş ve Laporte (2011), bu tanımlamalar ışığında KERP'ni dört ayrı şekilde ele almışlardır. Her dört problemde de K adet araç; başlangıçta depo düğümünden hareket etmekte ve en son olarak da depo düğümüne dönmektedirler. Araçlar problemlerin tümünde Q olarak gösterilen

kapasitelerini aşmayacak şekilde yüklenmektedir. Bu problem tipleri, amaç fonksiyonları yönünden farklılaşmaktadırlar.

P_D (Problem-Distance minimizing) ile gösterilen problem türünde sabit bir hız ile kat edilen toplam mesafe en küçüklenmektedir. Bu problem tipi klasik KARP veya ZPKARP problemi ile aynıdır.

P_L (Problem-weighted Load minimizing) ile gösterilen problem türünde ise yük miktarı ile ağırlıklandırılmış toplam mesafe en küçüklenmektedir. Bu problemde de hız, sabit olarak kabul edilmiştir. Bu problem tipi, Kara ve diğerlerinin (2007) çalışmasına benzer bir model kullanılmıştır. Araç üzerindeki mevcut yük ile bu yükle beraber katettiği ayrıt uzunluğu çarpılarak bir ağırlıklandırma yapılmıştır. Kara ve diğerlerinin (2007) çalışmalarından farklı olarak yakıt tüketimine yönelik Barth ve diğerleri (2009) tarafından öne sürülen model ve parametrelerden faydalanılmıştır.

Üçüncü tür problem P_E (Problem-Energy minimizing) ile gösterilmiş ve hızın da bir değişken olarak ele alındığı, harcanan enerji miktarını en küçükleyen amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

P_C (Problem-Cost minimizing) ile gösterilen dördüncü ve en son tip problemde ise toplam maliyeti en küçükleyen bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonu yakıt ve SGS maliyetlerinin yanında, sürücü ücretlerini de dikkate alacak şekilde tanımlanmıştır. Bu modelde de hız yine bir değişken olarak kullanılmıştır.

a. KERP İçin Kullanılan Yakıt Tüketim Fonksiyonu

KERP'nin P_E ve P_C türlerinde harcanan yakıt miktarını ve buna bağlı olarak da harcanan enerjiyi bulmak için yazarlar, Barth ve diğerleri (2005; 2009) tarafından öne sürülen yakıt tüketim fonksiyonunu modellerinde kullanmışlardır.

Barth ve diğerleri (2005; 2009) tarafından önerilen yakıt tüketim modelinde, E ile gösterilen anlık SGS (gr/sn) ile anlık kullanılan yakıt miktarı olan F arasında doğrusal bir ilişki vardır ve bu ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$E=\delta_1 F+\delta_2 \quad (1)$$

Bu eşitlikte δ_1 ve δ_2 parametreleri SGS için özel salınım parametreleridir. Eşitlikte yer alan F in hesaplanması ise karışık bir işlemdir ve birçok faktöre dayanmaktadır. Barth ve diğerleri (2005; 2009) tarafından önerildiği şekli ile sadeleştirilerek aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$F \approx (KNV + (P_t/\varepsilon + P_a)/\eta)U \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte;

K Motor sürtünme faktörünü,

N Motor hızını (tur/sn),

V Motor hacmini (m^3),

P_t Watt cinsinden gerekli çekiş gücünü,

ε Araç sürüş verimliliğini,

P_a Watt cinsinden çalışma esnasında kaybolan gücü,

η Dizel motorlar için verimlilik katsayısını,

U N in de dâhil olduğu bazı sabitleri temsilen bir değeri göstermektedir.

(2) numaralı eşitlikte yer alan P_t nin hesaplanması için gerekli olan fonksiyon sadeleştirilerek, bir aracın i ve j noktalarını birleştiren θ_{ij} açılı bir eğime sahip bir ayırıt üzerinde v_{ij} (m/sn) ortalama hızı ile seyahat edeceği kabul edildiğinde, bu ayırıt üzerinde aracın seyahat ederken harcayacağı enerji P_{ij} ile gösterilebilir ve şu şekilde yakınsanmaktadır (Barth ve diğerleri, 2009);

$$P_{ij} \approx \alpha_{ij}(w + f_{ij})d_{ij} \quad (3)$$

$$+ \beta v_{ij}^2 d_{ij} \quad (4)$$

P_{ij} yi bulmak için kullanılan yukarıdaki eşitliğin (3) numaralı bölümü yük kaynaklı enerji ihtiyacını, (4) ise hız kaynaklı enerji ihtiyacını göstermektedir. Yukarıdaki eşitlikte

α_{ij} Ayrıtma özel yer çekimi ve eğimi dikkate alan sabiti,

w Aracın boş ağırlığını (kg),

f_{ij} i-j arası taşınan yükün ağırlığını (kg),

d_{ij} i-j arası uzaklığı (m),

β Araca özel aerodinamik sabiti göstermektedir.

(3) ve (4) numaralı eşitlik bölümlerinde yer alan α_{ij} ve β sabitlerini bulmak için (5) ve (6) numaralı eşitlikler kullanılmaktadır.

$$\alpha_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij} \quad (5)$$

Burada;

a İvmeyi (m/sn^2),

g Yer çekimi sabitini (m/sn^2)

C_r Direnç katsayısını göstermektedir.

$$\beta = 0,5 C_d A \rho \quad (6)$$

Burada;

C_d Çekiş katsayısını,

A Aracın ön yüzünün alanını (m^2),

ρ Hava yoğunluğunu (kg/m^3) göstermektedir.

Bu yakıt tüketim fonksiyonunun kullanılması iki ana sebebe bağlanabilir; ilk olarak yükteki ve hızdaki değişimler de kat edilen mesafe ile birlikte dikkate alınmaktadır. Bu fonksiyon ayrıca yazarlarının da belirttiği gibi

gerek hafif, gerek orta, gerekse ağır malzeme taşımacılığında kullanılabilmektedir. Öte yandan fonksiyonun grafiği çizildiğinde, Şekil-4'te de görüldüğü gibi U şeklinde olduğundan; salınımın en küçüklendiği andaki hızın belirlenmesi kolay olmaktadır (Bektaş ve Laporte, 2011).

KERP ile yapılan çalışmalarda, A.B.D ve İngiltere gibi araç sürücülerinin ücretlerinin çalıştıkları saat üzerinden belirlendiği ülkelerde P_C olarak gösterilmiş olan toplam maliyeti en küçükleyen problem tipinde; toplam maliyeti belirleyen ana faktörün sürücü ücretleri olduğu görülmüştür. Dolayısıyla en iyi turlar belirlenirken sürücülerin araç kullandıkları toplam süre önem kazanmaktadır. Bektaş ve Laporte (2011) tarafından çözölen bazı P_C problemlerinde, harcanan toplam enerji klasik ARP'ne göre az da olsa artış, fakat toplam maliyette azalma gözlenmiştir.

b. KERP Matematiksel Modeli

Bektaş ve Laporte (2011) tarafından önerilmiş olan KERP'ne ilişkin matematiksel model, ilgili gösterimleriyle birlikte aşağıda sunulmuştur.

$G = (N, A)$ seriminde 0 düğümü depo olmak üzere, düğömler kümesi $N = \{ 0,1,2,...,n \}$, müşteriler kümesi $N_0 = N \setminus \{0\}$, ayrıtlar kümesi ise $A = \{ (i,j): i,j \in N, i \neq j \}$ olarak gösterilsin. Bunlara ek olarak r gibi bir hız aralığı tanımlanmıştır. Bu aralık $[l^r, u^r]$ olarak tanımlanmış ve ortalama hız da $v^r = (l^r + u^r)/2$ $r \in R$ olarak tanımlanmıştır.

Parametreler :

α_{ij} i - j ayrıtına özel yer çekimi ve eğim sabiti

β Araca özel aerodinamik sabit

m homojen araç sayısı (adet)

Q araç kapasitesi (kg)

q_i i nci müşterinin talebi (kg)

$[a_i, b_i]$ i nci müşterinin talebinin karşılanması gereken zaman aralığı

t_i i nci müşterinin servis zamanı

d_{ij} i-j düğümleri arası mesafe (m)

l_{ij}, u_{ij} i-j düğümleri arası hız sınırları (m/sn)

C_f+e birim Sera Gazı Salınımı maliyeti

w araç boş ağırlığı (kg)

y_j j düğümünde servis başlama zamanı

s_j depoya dönmekten önce en son uğranan düğüm j iken turdaki toplam geçen süre (sn)

p sürücü birim ücreti (TL/saat)

Karar değişkenleri :

$x_{ij} = \begin{cases} 1 ; & \text{herhangi bir araç } i - j \text{ ayrıtını kullanıyorsa} \\ 0 ; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

$z_{ij}^r = \begin{cases} 1 ; & \text{bir araç } i - j \text{ ayrıtında } r \text{ hızı ile ilerlerse} \\ 0 ; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

f_{ij} i-j arası taşınan yük miktarı (kg)

olmak üzere KERP' nin P_C türüne ait matematiksel model aşağıdaki gibidir.

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} \quad (7)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} \quad (8)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) d_{ij} \beta \left[\sum_{r \in R} (v^r)^2 z_{ij}^r \right] \quad (9)$$

$$+ \sum_{(j) \in No} p s_j \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j} = m \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in No \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in No \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in No \quad (14)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (15)$$

$$y_i - y_j + t_i + \sum_{r \in R} \left(\frac{d_{ij}}{v^r} \right) z_{ij}^r \leq M_{ij} (1 - x_{ij}) \quad \forall (i) \in N, j \in No, i \neq j \quad (16)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall (i) \in No \quad (17)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{r \in R} \left(\frac{d_{j0}}{v^r} \right) z_{j0}^r \leq L (1 - x_{j0}) \quad \forall j \in No \quad (18)$$

$$\sum_{r \in R} z_{ij}^r = x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (20)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (21)$$

$$z_{ij}^r \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, r \in R \quad (22)$$

Amaç fonksiyonu; (7)-(10) arasında yer alan dört ayrı bölümden oluşmaktadır. (7) numaralı bölüm ile aracın ağırlığının, (8) numaralı bölüm ile de i-j ayrıtı üzerinde taşınan yükün etkisi hesaplanmıştır. (9) numaralı bölüm ile ise hızdaki değişimlerin etkisi hesaba katılmaktadır. (10) numaralı bölüm ile de sürücü ücretleri hesaplanarak toplam maliyet hesabı tamamlanmış olmaktadır.

Modeldeki (11) numaralı kısıt ile m adet aracın depodan ayrılması sağlanmaktadır. (12) ve (13) numaralı kısıtlar klasik atama kısıtlarıdır ve eğer bir düğüme giriş varsa çıkış da olmasını ve bunların sadece bir kez olmasını sağlamaktadırlar. Akışın korunumu (14) numaralı kısıt tarafından sağlanmaktadır. (15) araç kapasitesinin aşılmaması ve de araçta en az bir sonra uğranacak düğümün talebi kadar malzeme olması sağlanmaktadır. Zaman penceresi kısıtları (16) ve (17) numaralı kısıtlar aracılığı ile sağlanmaktadır. (18) toplam sürüş zamanı olan s_j değerlerinin bulunması için denkleminin doğrusallaştırılmış halidir. (19) karar değişkenleri arasındaki ilişkilendirme kısıtlarıdır. (20), (21) ve (22) numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

Görüldüğü gibi bu modelde iki nedenle doğrusal olmayan yapı vardır. Yakıt tüketim fonksiyonunun (4) numaralı bölümü ve depoya dönüş öncesi uğranan son düğümün j düğümü olması durumunda toplam sürüş zamanını veren

$$S_j = (y_j + t_j + d_{j0}/v_{j0})x_{j0} \quad (23)$$

eşitliği. Önerilen model iki değişiklik ile doğrusal bir model haline getirilmiştir. İlk olarak yakıt tüketim fonksiyonunun (4) numaralı bölümünde yer alan v_{ij} (hızın karesi) ifadesi, z'_{ij} değişkeni aracılığıyla doğrusallaştırılmıştır. İkinci olarak toplam sürüş zamanı eşitliği (18) numaralı kısıtlar ile doğrusallaştırılmıştır. Burada L büyük bir rakamı göstermektedir.

Yukarıda verilen model, yapılacak basit değişiklikler ile KERP'nin diğer türleri olan P_D , P_L ve P_E' ye dönüştürülebilmekte ve zaman penceresi kısıtları ile veya onlar olmadan kullanılabilir.

4. YEŞİL LOJİSTİK VE UYGULAMALARI

Yeşil lojistik (Green Logistics); ürünlerin üretiminin ve dağıtımının daha sürdürülebilir (dayanıklı) bir şekilde ve tüm bunların çevresel ve sosyal faktörleri de göz önüne alacak bir şekilde yapılması ile ilgilenmektedir. Bu nedenle de amaçlar sadece ekonomik etkilerle değil, kirlenme gibi sosyal ve fiziki çevreyi etkileyen durumlarla da ilgilenmektedir (Sbihi ve Eglese, 2010).

Yeşil lojistik faaliyetlerinden bazıları; değişik dağıtım stratejilerinin çevreye olan etkilerini ölçmek, lojistik faaliyetlerde kullanılan enerji miktarını azaltmak, atık miktarını azaltmak ve atık yönetimini çevreye daha duyarlı bir şekilde ele almaktır. Son yıllarda insan aktivitelerinin çevreye olan etkilerinin incelenmesi ve değerlendirilmesine yönelik yapılan yoğun çalışmalar, günümüzdeki birçok metodun ilerleyen yıllarda kullanılamayabileceğini göstermektedir (Klasik ARP ile belirlenen güzergâhlar yerine kirliliği veya yakıt miktarını enküçükleyen modellerden elde edilen güzergâhların kullanılması gibi). Birçok organizasyon ve iş kolları, kendi faaliyetlerinin çevresel izlerini takip edebilmek maksadıyla, kendi Karbon Ayak İzlerini ölçmeye başlamış durumdadır. Bu konuda hükümetler de çeşitli düzenlemeler ve kontroller geliştirmekte, hatta uluslar arası görüşme ve protokoller yapılmaktadır.

Yapılan çalışmalarda firmaların Karbon Ayak İzlerinin %75'ini lojistik faaliyetlerin oluşturduğu belirlenmiştir. Bu alanda yapılacak iyileştirmelerin etkisi sadece çevre açısından değil, enerji tasarrufu ile birlikte ekonomik olarak da firmalar için olumlu olacaktır. Ayrıca firmaların bu gelişmeleri takip etmemeleri, onları bazı pazarlara girememe gibi durumlarla da karşı karşıya bırakabilir. Yukarıda da açıklandığı gibi hükümetler her geçen gün yeni düzenlemeler yapmakta ve çevreye saygısı olmayan ve belirli standartları sağlamayan ürünlerin girişine engel olabilmektedir (IOMA, 2007).

Knörr (2008) tarafından yapılan çalışmada taşımacılık faaliyetlerinin çevre üzerindeki zararlı ve tehlikeli etkilerinden bazıları kaynakların tüketimi, arazi kullanımı ve kirlenmesi, asit oranlarındaki artış, maddelerin ekosistemler ve insanlar üzerindeki zehirleyici etkileri, gürültü ve SGS'ları

olarak belirtilmektedir. Bunlardan bazıları, örneğin en etkili ve tehlikeli olanı olan CO₂ salınımı, doğrudan insan sağlığını tehdit ederken ozon tabakasına verilen zarar gibi dolaylı etkileri olanlar da mevcuttur.

Taşımacılık faaliyetlerinin bu zararlı etkilerden ne kadar sorumlu olduğuna ilişkin McKinnon (2007) ve Ohnishi (2008) tarafından yapılan çalışmalarda İngiltere'de ülke çapındaki CO₂ salınımının %6'sından hava yolu taşımacılığı sorumlu iken kara yolu taşımacılığının bu konudaki payı yaklaşık %92'dir. A.B.D taşımacılık sektörü incelendiğinde tüm SGS içinde taşımacılığın yüzdesinin 1990-2005 yılları arasında %24,9'dan %27,3'e çıktığı gözlenmiştir. Bu yüzdelerinde yaklaşık %78'ini kara yolu taşımacılığı oluşturmaktadır.

Günümüzde çevreye olan duyarlılığın artması, halen kullanılmakta olan karbon temelli yakıtların dünya üzerindeki stoklarının hızla azalıyor olması ve ekonomik kaygılar; daha doğa dostu ve ekonomik çözümler için organizasyonları zorlamaktadır. Özellikle kombinatoryal eniyileme konusunda Yeşil Lojistik uygulama ve modelleri için Sbihi ve Eglese (2010) nin kapsamlı bir çalışması bulunmaktadır.

Firmaların bu konuda atabileceği somut adımlarla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, belli başlı çevresel girişimler yapılabilecek faaliyet alanları ve faaliyetler şu şekilde belirlenmiştir (IOMA, 2007);

- Ürün tasarımı ve paketleme
- Geri dönüşüm programları
- Akıllı (smart) taşıma programları
- Ürünlerin geri iadesi ve değerlendirilmesi
- Dinamik araç rotaları
- Dayanıklı binalar
- Melez veya elektrikli araç kullanım ve geliştirilmesi

- 'Yeşil Düşünme' ve sürekli taşıma politikaları
- Atıkların azaltılması ve yönetimi
- Yeşil Lojistik teknoloji gelişimine destek
- Kâğıt ve enerji tüketiminin azaltılması
- Doğa dostu malzeme kullanımı
- Yükleme verimliliğinin artırılması ve yakıt tüketiminin gözlenmesi
- Müşterilerin bu konulardaki taleplerine cevap verme
- Küresel konumlama cihazlarının yaygın kullanımı
- Güneş enerjisinden faydalanma
- Hidrojenin yakıt olarak kullanımı
- Zehirli ve tehlikeli kimyasalların kullanımının azaltılması (IOMA, 2007)

Yeşil Lojistik ile ilgili çalışmalarda karşılaşılan bir diğer yeni kavram da Tersine Lojistik kavramıdır. Tersine lojistik; yeniden üretim, geri kazanım, yok etme veya kaynakları etkin şekilde kullanmak üzere ürün ya da parçaların akışını yönetmek için yeniden tasarlanmış tedarik zincirini içerir (Rogers ve Lembke, 1998).

Ancak tersine lojistiğin yeşil lojistikten farklı olduğuna dikkat edilmesi gerekir. Yeşil lojistik üreticiden tüketiciye doğru olan tüm lojistik faaliyetlere çevresel bakış açısıyla odaklanırken; tersine lojistik, esasen tüketiciden üreticiye doğru olan faaliyetlerle ilgilenir. Yine de tersine lojistiğin de çevresel ve ekonomik bakış açısı mevcuttur. Tersine lojistiğin başlıca faaliyetleri aşağıdadır;

- Tamir

- Ürün yenileştirme
- Yeniden üretim
- Geri dönüşüm
- Ürün yamyamlaştırma (product cannibalization) (kullanılmış ürün ya da bileşenden, kullanılabilir sınırlı bir dizi parçanın geri alınması; bunların başka ürün veya bileşenin tamir,yenilenme veya yeniden üretiminde kullanılması) (Bulut ve Deran,2008).

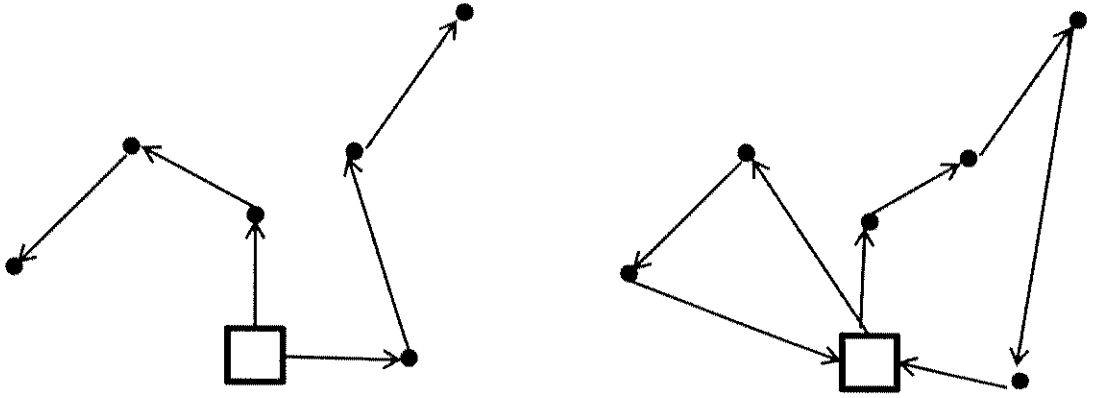
Sonuç olarak dünyada giderek artan bir şekilde çevreye karşı duyarlılık oluşmakta ve çevre kirliliğine yol açmayacak önlemler alınmaya çalışılmaktadır. Çevrenin özellikle sera etkisi olarak bilinen ve karbon gazları salınımıyla oluşan sorundan ciddi olarak etkilendiği bilinmektedir. Karbon gazlarının oluşumunda da lojistik faaliyetlerinin önemli ölçüde sorumlu olduğu anlaşılmıştır. Gelişen dünyada gelecek on yıllar içinde en fazla gelişmesi beklenen sektörler arasında lojistik olduğu da bilinmektedir. Bu durumda çevre açısından önlemler alabilmek için lojistik faaliyetlerinin gözden geçirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bunun için özellikle araç rotalarının belirlenirken sera gazı salınımını enküçük yapacak turların belirlenmesine özen gösterilmesi gerektiği de açıktır. Bu, özellikle ağır malzemelerin taşınmasında daha da önemlidir. Dolayısıyla ağır malzemelerin taşınması işinde araç rotalarının sera gazı salınımını en az yapacak şekilde belirlenmesi çevre için hayati öneme sahip bir konu olarak öne çıkmaktadır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

AÇIK TURLU KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA PROBLEMİ

1. AÇIK ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Açık araç rotalama problemi (AARP), klasik ARP'nin bir uzantısıdır ve bu problem türünde araçlar son uğradıkları düğümden depo ya da başlangıç düğümüne geri dönmezler. AARP'lerinde belirlenen uygun rotalar depo ya da başlangıç düğümü ile başlar, talep sahibi bir düğümde son bulur. Klasik ARP ile AARP arasındaki fark, Şekil-5'te görülmektedir.



Şekil-5: a) Açık ARP

b) Klasik ARP

(Tüfekçier, 2008).

Şekil-5'ten de anlaşılacağı gibi klasik ARP'de turlar birer Hamilton Turu olmasına karşın AARP'de turlar birer Hamilton Yolu dur. Diğer bir deyişle bir AARP'de; başlangıç düğümü sabit bir en kısa Hamilton Yolu Problemi (HYP) çözülmek zorundadır. Literatürdeki çalışmalardan en kısa HYP'nin NP-Zor bir problem olduğu bilindiğinden; AARP de NP-Zor sınıfında bir problemdir (Aksen ve diğerleri, 2007).

AARP, literatürde klasik ARP'den daha az ilgi görmüştür. Ancak günümüzde gerçek yaşamda AARP uygulamalarına gittikçe artan bir şekilde rastlanmaktadır. Birçok lojistik firması kullandıkları araçları kiralama yoluna

gitmekte, bu nedenle de sadece son hizmet verilecek olan düğüme kadar planlama yapmaktadır. Gazete firmaları, günlük dağıtım işlemleri için taşımacılık firmalarıyla anlaşmakta ve sadece basım merkezleri ile son dağıtım noktası arasındaki güzergâhla ilgilenmektedir. Bu uygulamaların hiç birinde araçların depoya dönme zorunluluğu bulunmamaktadır.

AARP ilk kez Schrage (1981) tarafından, bir çözüm yöntemi önerilmeden tanımlanmıştır. Daha sonra Bodin ve diğerleri 1983 yılında; AARP tanımını bir Amerikan kargo firmasının uçakları için açık uçlu rotalar üreterek yapmıştır. Buna göre bir uçak ana merkezden ayrılır, birçok şehre teslimat yapar ve başlangıç noktasına geri dönmez. Son teslimat noktasında bekler ve toplama için yeni rotanın belirlenmesinden sonra kargoları toplayarak geri döner. Bu çalışmada Bodin ve diğerleri Clarke-Wright algoritmasını iki ayrı problemi çözecek şekilde (dağıtım ve toplama) AARP'ne uygulanabilecek şekilde geliştirmişlerdir (Li ve diğerleri, 2007).

Sariklis ve Powell (2000) ceza yöntemini ve en küçük örten ağaç yöntemini kullanarak önce kümele, sonra rotala algoritmasını geliştirmiştir. Geliştirilen bu sezgisel algoritmanın ilk bölümünde, düğüm kümeleri belirlenmiş ve bu kümelerden, en az yayılan ağaç yöntemiyle rotalar oluşturulmuştur. Brandao (2004) ise AARP'ni çözmek için yasaklı arama yöntemini kullanmıştır. Başlangıç çözümü elde etmek için k-ağaç yönteminden ve en yakın komşuluk sezgiselinden faydalanmış ve başlangıç çözümünü yasaklı arama yöntemini kullanarak iyileştirmiştir.

Tarantilis ve diğerleri (2004) yaptıkları çalışmada, bir ARP karar destek sistemini geliştirmişler ve bu karar destek sisteminde AARP'yi çözmek için bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritmaya, BoneRoute ileri sezgisel metodu adını vermişlerdir. Geliştirilen bu ileri sezgisel metot, adapteli hafıza tekniğini temel alan bir yaklaşımdır. Fu ve diğerleri (2005) yaptıkları çalışmada, AARP'nin çözümü için geliştirdikleri yeni bir yasaklı arama yöntemini tanıtmışlardır. En uzaktaki en önce yöntemi; başlangıç çözümü için kullanılmış ve algoritmanın etkinliği literatürdeki diğer sezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Psinger ve Ropke (2007) AARP'nin de içinde bulunduğu ARP türlerinden beş tanesi için kullanılabilen bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Slaw tarafından geliştirilen geniş komşuluk arama algoritmasının biraz gelişmiş bir hali olan bu algoritma, adapteli geniş komşuluk arama algoritmasıdır.

Li ve diğerleri (2007) çalışmalarında, AARP için geliştirilen algoritmaları incelemişler, Dueck tarafından geliştirilen ve tavlama benzetiminin deterministik bir türü olan “kayıttan kayıda” algoritmasını baz alacak şekilde “açık kayıttan kayıda” algoritmasını geliştirmişlerdir. Başlangıç çözümü süpürme algoritmasıyla elde edilmiştir .

Fleszar ve diğerleri (2009) AARP çözümü için değışken komşuluk arama sezgisel algoritmasını geliştirmişlerdir. Başlangıç çözümü en uygun azalan talep algoritmasıyla elde edilmiş ve yaptıkları testlerle algoritmalarını, çözüm kalitesi açısından en performanslı sezgisel algoritmalarla kıyaslamışlardır. Repoussis ve diğerleri (2010) AARP'yi aşamalar halinde çözmek için melez bir strateji geliştirmişlerdir. Çalışmalarında yerel arama ve yasaklı arama yöntemlerinden faydalanmışlardır.

Li ve Tian (2009) AARP'ni çözmek için karınca kolonisi metodunu yerel arama metoduyla birleştiren yeni bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Yaptıkları testlerle bu algoritmanın AARP'yi çözmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Russel ve diğerleri (2008) çalışmalarında, gazete üretim ve basımhaneden ana dağıtım noktalarına dağıtım işini yöneten bir ileri sezgisel yöntem tanıtmışlardır. Tanıttıkları bu yöntem ile bir şehirdeki gerçek hayat gazete dağıtım problemini çözmüşlerdir. Çalışmalarında, zaman pencerele araç rotalama problemi ile ilgilenmişlerdir. Tüfekçier (2008) tez çalışmasında, iki amaçlı bir ARP için çözüm yaklaşımı sunmuştur. Çalışmasında, ürünlerin dağıtımı kiralık araçlar ile gerçekleştirilen bir işletmenin en az sayıda araç ile ve toplam kat edilen mesafe de en küçüklenerek belirlenmesine çalışılmıştır .

Tarantilis ve Kiranoudis (2002), Atina şehrinde gerçek hayat taze et dağıtım problemi ile ilgilenmişler ve çalışmalarında, çok depolu AARP'ni

çözmüşlerdir. Ele alınan problem için liste tabanlı eşik kabullü algoritmayı geliştirmişlerdir.

Letchford ve diğerleri (2007) AARP'yi çözmek için kesin yöntemlerden yararlanmak istemiş ve bu amaçla kapasiteli AARP için bir dal kesme algoritması geliştirmişlerdir. AARP için ilk tam eniyileme algoritması niteliğini bu algoritma taşımaktadır. Bu çalışmada kapasiteli AARP'nin, gerçekte KARP'nin küçük değişikliklerle, başka bir versiyonu olduğu gösterilmiştir. Küçük ve orta ölçekli AARP için sonuç üretilebildiği gösterilmiştir.

Aksen ve diğerleri (2007), çalışmalarında AARP'nin bir türü olan, sürücü noktalı AARP ile ilgilenmişlerdir. Bu çalışmada, araçlar depodan çıkmakta ve düğümlere uğradıktan sonra sürücüler için önceden belirlenmiş olan bitiş noktalarına ulaşırlar. Bitiş noktaları sürücülerin evi veya aracın gece boyunca kalacağı park noktası olabilir. Araştırmacılar bu problem için kesin çözüm yöntemi araştırmış ve bu problemin çözümü için tamsayılı programlama modeli ortaya koymuşlar, ayrıca bir yasaklı-arama algoritması da geliştirmişler ve çeşitli problemler üzerinde algoritmanın performansını denemişlerdir.

Bektaş ve Elmastaş (2007) çalışmalarında okul ARP'ni konu almışlar, doğrusal programlama modelini kurarak problemi çözmüşlerdir. Geliştirdikleri model, kapasite ve rota uzunluğu kısıtı olan AARP'dir. Problemde 29 tane düğüm noktası olmasına rağmen depo düğümü ve hayali "d" noktası da eklenince uzaklık matrisi 31X31 lik hale gelmiştir ve problemin en iyi çözümünü bulmuşlardır.

2. AÇIK TURLU KİRLİLİĞİ ENKÜÇÜKLEYEN ROTALAMA PROBLEMİ

Bu çalışmanın temel amacı, literatürde KERP olarak bilinen problemin açık turlu, heterojen filolu, hem dağıtım hem de toplamının olduğu özel durum için problemin tanımlanması ve çözülmesidir. Bu amaçla ilerleyen alt bölümlerde Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi tanımlanmakta ve önerilen matematiksel modeli sunulmaktadır.

a. Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Probleminin Tanıtımı

Önceli bölümlerde de açıklandığı gibi günümüz gerçek hayat problemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı taşımacılık yapan araçlar için her geçen gün artan bir şekilde açık turlu rotalar belirlenmektedir. Bu sebeplerden bazıları firmaların araç kiralaması, taşımacılık faaliyetini tamamen başka firmalar aracılığı ile yapması veya sürücülerin son düğümden sonra evlerine veya belirli bir toplanma noktasına gitmesinden kaynaklanabilmektedir. Bu durumlarda problemin kendisi açık turlu rotalara kendiliğinden ihtiyaç duymaktadır.

Bazı durumlarda ise firmalar veya kuruluşlar, dağıtım ve toplama işlerini önceden belirlenen tek bir güzergâhın iki defa (ters istikametlerde) kat edilmesi yerine; en son düğüme ulaşıldıktan sonra güncel bilgiler ışığında tekrar rotaların belirlenmesini talep etmektedirler. Müşterilerin anlık değişen talepleri, müşteri eksilme ya da artışı, son düğüme ulaşılan kadar geçen sürenin çok uzun oluşu, tersine lojistiğin daha önce bahsedilen temel faaliyetleri kapsamında toplama işlemlerinin yapılması gibi sebeplerle açık turlu rotalara ihtiyaç duyulabilmektedir.

Doğal afetlerde yardımların afet bölgesine ulaştırılması, güvenlik güçlerinin veya devriye personelinin, barikat malzeme ve teçhizatının yerleştirilmesi, mühimmat ve teçhizat ihtiyacı olan güvenlik güçlerine ihtiyaçlarının ulaştırılması gibi durumlarda taşıma vasıtalarının dönüş durumu dikkate alınmadan, tüm talep noktalarına en hızlı şekilde ulaşılması önem kazanmaktadır. Bu tür problemlerde açık turlu rotalar içeren modellerin kullanılması uygun olmaktadır.

Güvenlik güçlerinin özellikle barış zamanında mühimmat, teçhizat, araç, araç motor ve parçaları ve diğer ikmal maddelerinin taşınması; lojistik faaliyetlerinin içinde önemli bir yer tutmaktadır. Tüm bu ihtiyaçlarını gerek barış, gerekse savaş zamanı karşılayacak bir tedarik zincirine ihtiyaç duyan güvenlik güçleri; bu yapılanmalarını her zaman işler tutmaya çalışmaktadır.

Özellikle savaş zamanı meydana gelecek önemli aksaklıklar hayati sonuçlar doğurabilirler.

Kress (2005) çalışmasında güvenlik güçlerinin tedarik zincirlerinin iki bölümden oluştuğunu belirtmiştir. Bunlar barış zamanı tedarik zinciri ve savaş zamanı tedarik zinciri olarak isimlendirilmiştir.

Savaş zamanı tedarik zincirinde taktik kararlar alınmakta ve etkileri derhal gözlenebilmektedir. Ancak bu dönemle ilgili bazı problemler de mevcuttur. Öncelikle sistemde mevcut risk seviyesi oldukça yüksektir ve mutlaka olasılık hesapları ile birlikte dikkate alınmalıdır. Bu dönemde kullanılan sistemler dinamik bir yapıya sahiptir ve bu da karar alma sürecini zorlaştırmaktadır. Birçok alanda da belirsizlikler mevcuttur.

Ancak barış zamanı tedarik zinciri daha belirli ve risksiz bir yapıya sahiptir. Kararlar daha belirli ortamlarda alınır ve sonuçları daha iyi gözlenebilir. Savaş dönemi tedarik zinciri ile ilgili stratejik seviye planlama ve kararlar bu dönemden alınır. Ancak bu husus, yanında bazı problemleri de getirmektedir. Çünkü barış zamanı tedarik zinciri faaliyetleri büyük miktarlarda kaynak kullanımını gerektirir. Bu yönden de Kress (2005) barış zamanı tedarik zinciri yönetimini bir 'iş' e benzetmiş ve buradaki amaçların ticari kuruluşlarda olduğu gibi maliyeti en küçüklemek, verimliliği arttırmak olması gerektiğini belirtmiştir.

Geniş bir coğrafyada konuşlu ülkelerde güvenlik güçleri açısından durum değerlendirildiğinde; taşımacılık faaliyetleri, harcamalarda önemli bir bölüm oluşturmaktadır. Erwin (2002) tarafından yapılan çalışmada Amerikan ordusundaki ağır taşımacılıkta kullanılan kamyon sayısının yaklaşık 240000 olduğu belirtilmiştir. Bu rakamın ve dolayısıyla harcanan yakıt miktarının azaltılması ile ilgili projeler kapsamında en etkili yol olarak dizel-melez araçların edinilmesi, araçların daha verimli şekilde yüklenmesi ve yakıt tüketimini azaltacak projelere hız verilmesi bulunmaktadır.

Ülkemizde de güvenlik güçleri tarafından kullanılmakta olan ilgili yayınlarda ulaştırma faaliyetlerinin yönetimi açısından belirli esaslar çerçevesinde hareket edilmektedir. Bu esaslardan birisi de kullanılacak

ulaştırma sistemlerinin ve bunların icra edeceği faaliyetlerin savaş zamanında en emniyetli ve sūratlı bir biğimde, barış zamanında ise en emniyetli ve ekonomik şekilde icra edilmesidir.

Teoride çok sık karřılařılmasına raęmen gerçek yařamda kullanılan araç filoları genellikle homojen deęillerdir. Araç filoları genellikle kapasite, maliyetler ya da farklı teknik özelliklere sahip deęiřik araçlardan oluřmaktadırlar. Bu nedenle gerçek yařam uygulamalarında genellikle heterojen araç filolu araç rotalama problemleriyle karřılařılmaktadır. Literatūrde ū tip heterojen araç filolu araç rotalama problemi ūzerine çalıřılmıřtır. Bunlardan ilki, her bir araç tipinin sınırsız olduęu varsayılan ve her bir araç tipi için aynı deęiřken maliyetlerin verildięi problemlerdir. Bu tip problemler Filo Būyūklūęu ve Karıřımı Araç Rotalama Problemi olarak adlandırılmıřtır. İkinci tip problemler, ilk tip problemlerde ihmal edilmiř olan araç tipine baęlı deęiřken maliyetlerin de dūřūnūldūęu problemlerdir. Ūūncū tip problemler ise araç sayılarını her tip araç için sınırlandırmak suretiyle ikinci versiyonun genelleřtirilmiř halidir (Gencer ve dięerleri,2011).

Daęıtımlı Toplamalı Araç Rotalama Probleminde (DTARP) homojen veya heterojen bir araç filosu ile bir veya daha çok depodan hareket ile mūřterilerin istekleri karřılanmaktadır. Literatūrde genellikle çalıřılmıř olan DTARPlerinde daęıtım ve toplama iřlemleri eř zamanlı olarak gerçekleřtirilmektedir. Daęıtım iřlemi esnasında mūřteri talepleri depo veya depolardan saęlanabileceęi gibi bazı talepler ise bir dięer mūřteriden alınarak bařka bir dūęūmde bulunan mūřteriye bırakma suretiyle de yapılabilir. Toplama iřleminde de benzer řekilde mūřterilerden alınan malzemeler bir dięer mūřteriye bırakılabildięi gibi tūm toplanan malzemeler depo ya da depolara gūtūrūlebilmektedir. Gerçek yařamda DTARPlerinin birçok uygulaması bulunmaktadır. Bunlardan bazıları yařlı veya engellilerin tařınması, kargo ve personel tařımacılıęı, řehir içi servis hizmetleridir (Toth ve Vigo, 2001).

Yukarıda belirtilen hususlar dikkatle incelendiğinde, ağır taşımacılık faaliyeti icra eden tūm özel ve kamu kuruluşlarının, daha ekonomik ve aynı zamanda çevreye daha duyarlı taşımacılık faaliyetleri icra edebilmeleri için

farklı modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan güvenlik güçlerinin mühimmat, araç, araç motor veya parçaları, teçhizat veya diğer ikmal maddelerin talep noktalarına ulaştırılması için gerekli araç rotalarını bulan matematiksel model geliştirilerek izleyen alt bölümde sunulmuştur.

Taşımacılıkta kullanılan heterojen bir filoya ait araçların en son hizmet götürdüğü talep noktasında kalması, müteakiben toplama faaliyetleri için toplama taleplerinin miktarlarını da dikkate alarak yeni rotalarının belirlenmesine olanak verecek şekilde KERP; açık turlu olacak şekilde düzenlenmiştir. Özellikle mühimmat ikmali esnasında dolu ve boş mühimmatın veya dolu mühimmat ile diğer malzemelerin birlikte taşınması uygun değildir. Emniyet açısından bir tehlike oluşturmamasının yanında ağır malzeme taşımada talebin indirilmesi esnasında önceki düğümlerden alınan malzemenin de kimi durumlarda tekrar indirilip bindirilmesi ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir.

Ayrıca mühimmatın yüklenmesi ve indirilmesi esnasında personelin daha fazla dikkat etmesi gerektiğinden depoda yüklenmesi biten araçlar, ile gündüz aydınlık süresinde sadece dağıtım taleplerini karşılanabilmektedir. Bu nedenle dağıtım talebi olan son noktaya hizmet verildikten sonra orada kalınarak müteakip gün toplama işleminin yapılması taktik açıdan daha uygun bir hareket tarzıdır.

Barış zamanında güvenlik güçlerinin ağır malzeme taşımacılığı faaliyetini 15 gün ile 30 gün arası değişen periyotlar ile tekrarlamaları, eniyi çözüm için gereken uzun bekleme süresini kabul edilebilir kılmaktadır.

Bu esaslar dâhilinde geliştirilen heterojen filolu, açık turlu ve önce dağıtım sonra toplama yapılan ve sera gazı salınımını enküçüklemeyi hedefleyen problemin ismi Açık Turlu Kirliliği Enküçükleyen Rotalama Problemi (AKERP) olarak belirlenmiştir.

b. AKERP Matematiksel Modeli

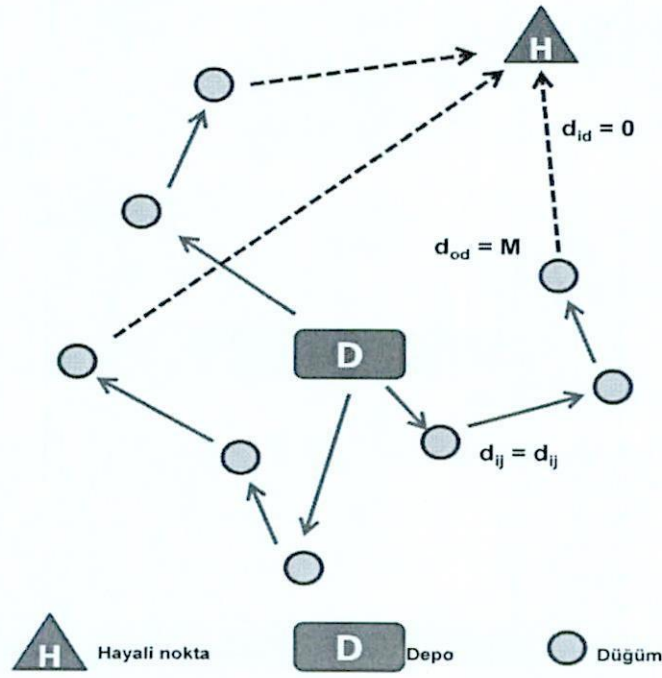
Kirliliği enküçükleyen rotalama probleminin çözümü için tasarlanan model önce ürün dağıtımını sonra da toplamayı gerçekleştirecek yapıda ve açık rotalı olarak tasarlanmıştır. Dağıtımda ilgili noktalara gönderilecek olan ürünler taşınacak, toplamada ise geri getirilmesi istenen malzemeler toplanacaktır. Doğal olarak araçların gidiş ve dönüş rotaları farklı olabilir.

Modelde sürücü ücretlerini içeren kısım, sürücülerin sabit ücretli olarak çalışacağı düşünüldüğü için amaç fonksiyonundan çıkarılmıştır. Yine bu hesaplamada kullanılan s_j değerlerini içeren kısıtlar da aynı gerekçe ile modelden çıkarılmıştır.

Baktaş ve Laporte tarafından tanımlanan modelin amaç fonksiyonu içerisinde yer alan $C_r + e$ (birim SGS maliyeti) parametresi, bu çalışmada geliştirilen modelden çıkarılmış ve böylece amaç fonksiyonu joule (kgm^2/sn^2) cinsinden harcanan toplam enerjiyi verecek şekilde düzenlenmiştir. Toplam enerjinin enküçüklenmesi, enerji ile kirlilik arasında doğrudan bağlantı olması nedeniyle, kirliliğin enküçüklenmesi anlamına gelmektedir.

Dağıtım işlemlerinin yapılarak geline son düğümde araçların kalmasını ve müteakiben toplama işlemini yapabilmelerini sağlamak için önce dağıtım planını verecek açık turlar oluşturulmuştur. Ancak açık turlu yapıyı elde edebilmek için serime 'h' adıyla hayali bir düğüm eklenmiştir. Bu yaklaşım, Bektaş ve Elmastaş (2007) tarafından çalışmalarında sunulan modelde önerilmiştir.

Hayali "h" düğümü ve örnek rotaların canlandırılmış hali Şekil-6'da verilmiştir. Hayali düğüm aslında deponun kendisidir. Araçların depodan düğümlere ve düğümlerden sonra hayali "h" düğümüne gitmesiyle sanki kapalı rota oluşturmuşlar gibi davranmaları sağlanmaktadır. Her düğümden hayali "h" düğümüne uzaklık "0" kabul edilmiş, böylece araçlar açık olarak rotalandıktan hemen sonra hayali "h" düğümüne gelmeleri sağlanmış ve hayali "h" düğümü ile depo arasındaki uzaklık "M" büyük sayısı olduğu kabul edilerek de araçların depodan çıkarken, hayali "h" düğümüne gitmemeleri sağlanmıştır. Böylece açık turlu rotalar elde edilmiştir.



Şekil-6 : Hayali Düğümün Şekil ile Gösterimi

Önerilen model, ilgili tanımlarıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

$G = (N, A)$ seriminde 0 düğümü depo olmak üzere, düğümler kümesi $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, müşteriler kümesi $N_0 = N \setminus \{0\}$, heterojen filo ya ait araçlar kümesi $K = \{0, 1, 2, \dots, k\}$, ayrıtlar kümesi ise $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ olarak gösterilsin. Bunlara ek olarak $v(r) = \{l, l+1, l+2, \dots, u-1, u\}$ ile hız kümesi gösterilsin. Parametreler :

α_{ij} i-j ayrıtlına özel yer çekimi ve eğim sabiti

β Araca özel aerodinamik sabit

$m(k)$ k tipindeki araç sayısı

$Q(k)$ k tipindeki araç kapasitesi

q_i i nci müşterinin dağıtımda talebi

p_i i nci müşterinin toplamada talebi

l_{ij}, u_{ij} i-j düğümleri arası hız sınırları

$w(k)$ k tipi aracın boş ağırlığı

$$d_{ij} = \begin{cases} 0; & i \neq 0 \text{ ve } j = h \text{ ise} \\ M; & i = 0 \text{ ve } j = h \text{ ise} \\ d_{ij}; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Karar değişkenleri :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1; & k \text{ aracı } i - j \text{ ayrıtını dağıtımda kullanıyorsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1; & k \text{ aracı } i - j \text{ ayrıtını toplamada kullanıyorsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$Hr_{ijk} = \begin{cases} 1; & k \text{ aracı } i - j \text{ ayrıtında dağıtımda } r \text{ hızı ile ilerlerse} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$HHr_{ijk} = \begin{cases} 1; & k \text{ aracı } i - j \text{ ayrıtında toplamada } r \text{ hızı ile ilerlerse} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

f_{ijk} i-j arası k aracı ile dağıtımda taşınan yük miktarı

ff_{ijk} i-j arası k aracı ile toplamada taşınan yük miktarı

olmak üzere AKERP'ne ait matematiksel model aşağıdaki gibidir.

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_k \alpha_{ij} d_{ij} w_k x_{ijk} \quad (24)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} \sum_k \alpha_{ij} d_{ij} f_{ijk} \quad (25)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} \sum_k \beta d_{ij} \left[\sum_{r \in R} (v^r)^2 Hr_{ijk}^r \right] \quad (26)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} \sum_k \alpha_{ij} d_{ij} w_k y_{ijk} \quad (27)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} \sum_k \alpha_{ij} d_{ij} f f_{ijk} \quad (28)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} \sum_k \beta d_{ij} \left[\sum_{r \in R} (v^r)^2 H H r_{ijk}^r \right] \quad (29)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq h}} x_{0jk} = m(k) \quad \forall k \quad (30)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq h}} y_{0jk} = m(k) \quad \forall k \quad (31)$$

$$\sum_{j \in No} x_{ijk} = \sum_{j \in No} x_{jik} \quad \forall k, \forall i \in No \quad (32)$$

$$\sum_{j \in No} y_{ijk} = \sum_{j \in No} y_{jik} \quad \forall k, \forall i \in No \quad (33)$$

$$\sum_{j \in No} \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in No \quad (34)$$

$$\sum_{j \in No} \sum_k y_{ijk} = 1 \quad \forall i \in No \quad (35)$$

$$\sum_{i \in No} \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in No \quad (36)$$

$$\sum_{i \in No} \sum_k y_{ijk} = 1 \quad \forall j \in No \quad (37)$$

$$\sum_{i \in No} x_{ijk} = \sum_k m(k) \quad j = h \text{ için} \quad (38)$$

$$\sum_{i \in N_0} y_{ijk} = \sum_k m(k) \quad j = h \text{ için} \quad (39)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_k f_{jik} - \sum_{j \in N} \sum_k f_{ijk} = q_i \quad \forall i \in N_0 \quad (40)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_k ff_{jik} - \sum_{j \in N} \sum_k ff_{ijk} = p_i \quad \forall i \in N_0 \quad (41)$$

$$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (Q(k) - q_i) x_{ijk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \quad (42)$$

$$p_j y_{ijk} \leq ff_{ijk} \leq (Q(k) - p_i) y_{ijk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \quad (43)$$

$$\sum_{r \in R} Hr^r_{ijk} = x_{ijk} \quad \forall i, j \in A, \forall k \quad (44)$$

$$\sum_{r \in R} HHr^r_{ijk} = y_{ijk} \quad \forall i, j \in A, \forall k \quad (45)$$

$$x_{ijk} = y_{ijk} \quad \forall i \in A, \quad \forall k, j = h \quad (46)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A \quad (47)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A \quad (48)$$

$$f_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j \in A \quad (49)$$

$$ff_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j \in A \quad (50)$$

$$Hr^r_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A, r \in R \quad (51)$$

$$HHr^r_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A, r \in R \quad (52)$$

Amaç fonksiyonu (24)-(29) arasındaki altı ayrı bölümden oluşmaktadır. Toplam harcanan enerji üzerinde; (24) numaralı bölüm ile dağıtım safhasında aracın ağırlığının, (25) numaralı bölüm ile de i-j ayrıtı üzerinde dağıtım safhasında taşınan yükün etkisi hesaplanmıştır. (26) numaralı bölüm ile ise dağıtım safhasında hızdaki değişimlerin harcanan enerji miktarına etkisi hesaba katılmaktadır. (27) numaralı bölüm ile ise bu sefer toplama

safhasında aracın ağırlığının, (28) numaralı bölüm ile de i-j ayrıtı üzerinde yine toplama safhasında taşınan yükün etkisi hesaplanmıştır. (29) numaralı bölüm ile de toplama safhasında hızdaki değişimlerin harcanan enerji miktarına etkisi hesaba katılmaktadır.

(30) numaralı kısıt ile k tipine ait m adet aracın depodan ayrılması sağlanmaktadır. (31) numaralı kısıt ile aynı husus; bu sefer toplama safhasına ait karar değişkenleri için düzenlenmiştir.

(32) ve (33) numaralı kısıtlar ile bir düğüme hangi tipte araç giriyorsa; yine o tipte aracın çıkması sağlanmaktadır.

(34) – (37) numaralı kısıtlar klasik atama kısıtlarıdır ve eğer bir düğüme giriş varsa çıkış da olmasını ve bunların sadece bir kez olmasını sağlamaktadırlar.

(38) numaralı kısıt ile tüm araçların hayali depoya ulaşması sağlanmaktadır. Aynı şekilde (39) numaralı kısıt ile de tüm araçların toplama işlemi için hayali depodan çıkış yapmaları sağlanmaktadır.

Akışın korunumu dağıtım safhası için (40) numaralı kısıtlar tarafından, toplama safhası içinse (41) numaralı kısıtlar tarafından sağlanmaktadır.

(42) numaralı kısıtlar ile dağıtımda araç kapasitesinin aşılmaması ve de araçta en az bir sonra uğranacak düğümün talebi kadar malzeme olması, (43) numaralı kısıtlar ile ise toplamada yine araç kapasitesinin aşılmaması ve de bir sonra uğranacak düğümden alınması gereken malzemenin alınması sağlanmaktadır.

(44) ve (45) numaralı kısıtlar karar değişkenlerinin ilişkilendirilmesi kısıtlarıdır.

(46) numaralı kısıt ile dağıtım sonrası hayali düğüme ulaşan ve açık turunu tamamlayan araçların, hayali düğüm öncesi son uğradıkları noktadan toplama faaliyetine başlamaları ve araç tipinin korunması sağlanır.

(47) – (52) numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

Depo düğümü ile birlikte toplam n adet düğümü bulunan, m araçlı heterojen filo içeren bir problemin boyut analizi sonuçları Tablo – 1’de verilmiştir.

KISIT	DEĞİŞKENLER	DEĞİŞKEN SAYILARI	KISIT SAYISI
$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq h}} x_{0jk} = m(k)$	$\forall k$	k	m
$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq h}} y_{0jk} = m(k)$	$\forall k$	k	m
$\sum_{j \in No} x_{ijk} = \sum_{j \in No} x_{jik}$	$\forall k, \forall i \in No$	k x (i-1)	m x (n-1)
$\sum_{j \in No} y_{ijk} = \sum_{j \in No} y_{jik}$	$\forall k, \forall i \in No$	k x (i-1)	m x (n-1)
$\sum_{j \in No} \sum_k x_{ijk} = 1$	$\forall i \in No$	(i-1)	(n-1)
$\sum_{j \in No} \sum_k y_{ijk} = 1$	$\forall i \in No$	(i-1)	(n-1)
$\sum_{i \in No} \sum_k x_{ijk} = 1$	$\forall j \in No$	(j-1)	(n-1)
$\sum_{i \in No} \sum_k y_{ijk} = 1$	$\forall j \in No$	(j-1)	(n-1)

$\sum_{i \in No} x_{ijk} = \sum_k m(k)$	$j = h \text{ iÇin}$	1	1
$\sum_{i \in No} y_{ijk} = \sum_k m(k)$	$j = h \text{ iÇin}$	1	1
$\sum_{j \in N} \sum_k f_{jik} - \sum_{j \in N} \sum_k f_{ijk} = q_i$	$\forall i \in No$	i	(n-1)
$\sum_{j \in N} \sum_k ff_{jik} - \sum_{j \in N} \sum_k ff_{ijk} = p_i$	$\forall i \in No$	i	(n-1)
$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (Q(k) - q_i) x_{ijk}$	$\forall (i, j) \in A, \forall k$	$2 \times i \times j \times k$	$2n^2m$
$p_j y_{ijk} \leq ff_{ijk} \leq (Q(k) - p_i) y_{ijk}$	$\forall (i, j) \in A, \forall k$	$2 \times i \times j \times k$	$2n^2m$
$\sum_{r \in R} H r^r_{ijk} = x_{ijk}$	$\forall i, j \in A, \forall k$	$i \times j \times k$	n^2m
$\sum_{r \in R} H H r^r_{ijk} = y_{ijk}$	$\forall i, j \in A, \forall k$	$i \times j \times k$	n^2m
$x_{ijk} = y_{ijk}$	$\forall i \in A, \forall k, j = h$	$i \times k \times 1$	nm
TOPLAM KISIT SAYISI		$6n^2m + 3nm + 6n - 4$	
TOPLAM DEĞİŞKEN SAYISI		$n^2m(2r+4)$	

Tablo 1 : Boyut Analizi Tablosu

Buna göre toplam düğüm sayısı 20, toplam araç sayısı 5, hız sınırları 41-90 arası olan bir problemde 12416 adet kısıt bulunmaktadır. Toplam değişken sayısı ise verilen parametreler için; x_{ijk} için $(20 \times 20 \times 5) = 2000$, y_{ijk} için $(20 \times 20 \times 5) = 2000$, f_{ijk} için $(20 \times 20 \times 5) = 2000$, ff_{ijk} için $(20 \times 20 \times 5) = 2000$, Hr_{ijk}^r için $(50 \times 20 \times 20 \times 5) = 100000$, HHr_{ijk}^r için $(50 \times 20 \times 20 \times 5) = 100000$ olmak üzere toplam 208000 dir.

Önerilen modelin bazı önemli üstünlükleri vardır. Bunlardan ilki araç rotalarını belirlerken alt tur engelleme kısıtları yazmayı gerektirmemesidir. Bunun nedeni modelde f_{ij} olarak tanımlanan ürün akış miktarlarının, yazılan akışın korunumu kısıtları nedeniyle tur boyunca giderek artan veya azalan şekilde çıkması zorunluluğudur. Bu zorunluluk nedeniyle bir alt turun oluşması mümkün değildir ve klasik araç rotalama problemi modellerini aksine ayrıca alt tur engelleme kısıtlarını yazmaya gerek yoktur. Bu durum Teorem 1'de ifade edilmiştir.

Teorem 1: Önerilen modelde verilen akışın korunumu kısıtları nedeniyle alt tur oluşması mümkün değildir.

İspat:

Varsayalım ki n tane düğüm arasında bir alt tur olsun. Bu alt tur 1-2-3-.....-($n-1$)- n şeklinde ifade edilsin.

f_{ijk} : i - j arasındaki akış miktarını

q_i : i düğümünün talebi olmak üzere; (40) numaralı kısıt gereği

$$\sum_{j \in N} \sum_k f_{jik} - \sum_{j \in N} \sum_k f_{ijk} = q_i \quad \forall i \in N_0$$

İlişkisi gerçekleşecektir. Eğer söz konusu düğümler arasında bir alt tur varsa $x_{12} = x_{23} = \dots = x_{n1} = 1$ olmalıdır. (42) numaralı kısıt gereği

$$q_j x_{ijk} \leq f_{ijk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall k$$

$f_{12} \geq q_2, f_{23} \geq q_3, \dots, f_{n1} \geq q_1$ olacaktır. Yani bütün f_{ij} ler pozitif değerli olmak zorundadır.

1-2-3-.....-(n-1)-n-1 turu için (40) numaralı kısıt gereği şu eşitlikler yazılır.

$$\sum_k f_{12} - \sum_k f_{23} = q_2$$

$$\sum_k f_{23} - \sum_k f_{34} = q_3$$

.

.

$$\sum_k f_{(n-1)n} - \sum_k f_{n1} = q_n$$

$$\sum_k f_{n1} - \sum_k f_{12} = q_1$$

Yukarıda verilen eşitlikler taraf tarafa toplandığında

$$\sum_k f_{12} - \sum_k f_{12} = \sum_{i=1}^n q_i$$

elde edilir. Elde edilen eşitliğin sol taraf değeri sıfır olduğundan ve talep toplamlarına eşit olan sağ taraf değeri de sıfır olamayacağından elde edilen son eşitlik gerçekleşemez. O halde 1-2-3-.....-(n-1)-n-1 düğümleri arasında bir alt tur olamaz.

Önerilen modelin bir diğer üstünlüğü, dağıtım ve toplama için gerekli rotaların bir defada ve problemde bütünsel eniyiyi yakalayacak bütünleşik şekilde belirlenmesidir. Tanımlanan problemde ürün dağıtımı ve toplanması aslında aynı anda yapılmadığı için iki farklı alt problemin çözülerek sonucun bulunabileceği düşünülebilir. Yani problem önce dağıtım rotalarını bulacak şekilde çözülsün, sonra da toplama için rotaları bulacak şekilde çözülsün ve iki aşamada elde edilen sonuçlar birleştirilsin şeklinde düşünülebilir. Ancak bu durumda dağıtım ve toplama problemlerinin her biri kendi içinde eniyilenmiş olur ve ikisinin amaç fonksiyonu değerlerinin toplamından oluşacak amaç fonksiyonu değeri, probleme bütünsel bakıldığında elde edilecek eniyi çözümü vermeyebilir. Bu nedenle problemde hem dağıtım hem de toplama işi bir arada ele alınarak bütünsel eniyiyi bulacak bir yapı geliştirilmiştir. Bu, elbette ki modelin büyümesine ve eniyi çözümü bulmak için daha çok çaba sarf edilmesine yol açacaktır. Yine de bütünsel eniyiyi bulmak açısından gereklidir. Örnek olarak türetilen test problemlerinden biri olan jen_n10_k3 için sözü edilen bu durumun gerçekleştiği de gösterilmiştir. Söz konusu test problemi 10 düğümlü, 3 araçlı bir problemdir ve probleme ait detaylı bilgiler EK-C'de verilmiştir. Bu problem önce sadece dağıtım rotalarını bulacak şekilde çözülmüş, daha sonra araçların kaldıkları yerden yola çıkıp sadece toplama yapmalarını sağlayacak şekilde de ikinci kere çözülmüştür. Elde edilen eniyi çözümlere karşı gelen amaç fonksiyonu değerleri şöyledir:

Sadece dağıtım yapılması halinde amaç fonksiyonu değeri 650703004,5 joule ve sadece toplama yapılması halinde amaç fonksiyonu değeri 623687402,5 joule, toplam değer 1274390407 jouledir. Oysa aynı problem önerilen modelle aynı anda dağıtım ve toplama rotalarını bulacak şekilde çözüldüğünde amaç fonksiyonu değeri 1246044682 joule olarak belirlenmiştir. Bu değer öncekinden %2.224 daha iyidir.

Elbette serimdeki düğüm sayısı artıkça değişken ve kısıtı sayısı ile bunlara bağlı olarak modelin eniyi çözümünü bulmak için harcanacak süre de artacaktır. Büyük boyutlu problemler için bütünsel eniyiyi bulmaktan vazgeçip önce dağıtım rotalarını bul, sonra da toplama rotalarını bul şeklinde bir strateji de uygulanabilir. Eldeki model buna izin verecek yapıdadır. Sonuç olarak önerilen modelle bütünsel eniyi bulunmaya çalışılmalıdır. Ama

problemin boyutları büyüdüğünde bütünsel eniyiden fedakarlık ederek problem iki aşamalı olarak da çözülebilir.

Önerilen modelin bir diğer üstünlüğü heterojen filo için çözüm bulabilmesi ve açık rota kullanmasıdır. Ayrıca istenirse küçük bir değişiklik ile çok merkezli (multiple depot) biçimine çevrilmesi de mümkündür.

Modele ait özel bir durum şu olabilir: i ve j düğümleri arasındaki yolda eğim var ise doğal olarak i 'den j 'ye gidişte harcanacak enerji ile j 'den i 'ye gidişte harcanacak enerji farklı olacaktır. Bu nedenle $\alpha_{ij} \cdot d_{ij}$ çarpımları ile elde edilen matris asimetrik olacaktır çünkü eğim verisini içeren α parametresi için $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$ elde edilecektir. Çözülen test problemlerinde eğim olmadığı için bu matris simetrik yapıdadır. Önerilen model simetrik matris için çözüm üretmektedir. Eğim bilgisinin kullanımı için modelin tekrar düzenlenmesi gerekmektedir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TEST PROBLEMLERİ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Literatürde erişilebildiği kadarıyla heterojen filolu AKERP için önerilmiş test problemleri yoktur. Bu nedenle önerilen modelin denenmesi ve ARP ile karşılaştırılması maksadıyla <http://www.branchandcut.org/> sitesinde asıl olarak KARP için yayınlanmış olan , <http://140.113.119.114/network/OVRP/ovrp.html> sitesinde asıl olarak AARP için yayınlanmış olan ve <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm> sitesinde de KERP için yayınlanmış olan bazı test problemleri seçilmiş ve çözümleri araştırılmıştır. Ayrıca bu test problemlerindeki verileri temel alan jenerik problemler de türetilmiştir. Test problemlerinin eniyi çözümleri, Pentium P6100 2,00 GHz işlemci, 3GB DDR3 RAM özellikteki bilgisayar kullanılarak GAMS IDE 23.7 yazılımı ve CPLEX çözücüsü ile elde edilmiştir.

1. TEST PROBLEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada üç grup test problemi ile çalışılmıştır. Birinci grup test problemleri yukarıda internet adresleri verilmiş olan sitelerden alınmış olan homojen filolu, açık turlu ve sadece dağıtım faaliyetini içeren problemlerdir. Bu problemlerin aslında kapalı turlu ARP (klasik VRP) için önerilmiştir. Ancak bu çalışmada açık turlu olarak çözülmüştür. Bu problemler AKERP'in çözülmesinden önce önerilen matematiksel modelin doğrulanması ve sonuçların karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

İkinci grup test problemleri, birinci gruptaki test problemlerinin heterojen filolu olacak şekilde dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. Problemi heterojen filolu hale getirmek için her problemde farklı araç türleri ve sayıları olduğu varsayılarak yeni problemler türetilmiştir. Ancak bu işlem yapılırken homojen araçlara ait toplam kapasite esas alınmış ve heterojen filonun toplam araç kapasitesi bu değerde olacak şekilde düzenleme yapılmıştır. Kısacası toplam araç kapasitesi aynı kalacak şekilde homojen filo heterojen

filoya dönüştürülmüştür. Bu grupta yine sadece taşımaların olduğu kabul edilmiştir.

Üçüncü grup test problemleri ise 2. grup test problemlerinin geliştirilmiş halidir. Burada da problemler sadece dağıtım değil, dağıtım ve toplamanın bir arada yapıldığı heterojen filolu test problemine dönüştürülmüştür. Dönüştürme işleminde, problemlerde zaten var olan dağıtıma dair talep değerleri aynen kullanılmış, toplama için de dağıtımdaki, talep değerlerine yakın olacak şekilde toplama için rassal toplama talep değerleri türetilmiştir.

Adresleri verilen sayfalardaki test problemlerinden farklı özelliklere sahip 24 tanesi seçilmiş, bunlarla birlikte türetilen problemlerin özellikleri Tablo – 2'de birlikte verilmiştir.

#	Ad	n	k	% sıklık		
				1 inci Grup	2 nci Grup	3 üncü Grup
1	uk_10_01	10	2	0,81	0,81	-
2	uk_10_02	10	2	0,71	0,71	-
3	uk_10_03	10	2	0,87	0,87	-
4	uk_10_04	10	2	0,73	0,73	-
5	uk_10_05	10	2	0,69	0,69	-
6	uk_10_06	10	2	0,68	0,68	-
7	uk_10_07	10	2	0,64	0,64	-
8	uk_10_08	10	2	0,84	0,84	-
9	uk_10_09	10	2	0,61	0,61	-
10	uk_10_10	10	2	0,75	0,75	-
11	uk_10_11	10	2	0,72	0,72	-
12	uk_10_12	10	2	0,71	0,71	-
13	uk_10_13	10	2	0,62	0,62	-
14	uk_10_14	10	2	0,67	0,67	-
15	uk_10_15	10	2	0,62	0,62	-
16	uk_10_16	10	2	0,99	0,99	-
17	uk_10_17	10	2	0,69	0,69	-
18	uk_10_18	10	2	0,69	0,69	-
19	uk_10_19	10	2	0,68	0,68	-
20	uk_10_20	10	2	0,85	0,85	-
21	p_n19_k2	19	2	0,97	0,97	-
22	p_n20_k2	20	2	0,97	0,97	-
23	p_n21_k2	21	2	0,93	0,93	-
24	p_n22_k2	22	2	0,96	0,96	-
25	jen_n17_k5	17	5	-	-	0,91
26	jen_n22_k6	22	6	-	-	0,96

27	jen_n12_k4	12	4	-	-	0,88
28	jen_n10_k3	11	3	-	-	0,95
29	jen_n20_k5	20	6	-	-	0,89
30	jen_n17_k6	17	6	-	-	0,76
31	jen_n18_k6	18	6	-	-	0,91
32	jen_n15_k4	15	4	-	-	0,88
33	jen_n6_k2	6	2	-	-	0,89

Tablo – 2 : Seçilen Test Problemlerinin Özellikleri

Tablo – 2'deki sütunlar sırasıyla test problemlerinin numaralarını (#), adlarını (Ad), boyutlarını (n) (problemdeki düğüm sayısı), problemde kullanılması gereken araç sayılarını (k) ve problemin sıklığını (% sıklık) göstermektedir. Bir problemin sıklığı, taşınacak toplam yükün toplam araç kapasitesine oranını gösterir. Bu değer ne kadar büyük ise çözüm de zorlaşmaktadır.

Tablo – 2'nin Ad sütununda uk kodu ile başlayan problemler Bektaş (2011) tarafından hazırlanan ve <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm> adresinden on-line olarak erişilebilen KERP test problemleridir. P ile başlayan problemler ise <http://www.branchandcut.org/> adresinden erişilebilen, KARP için Christofides vd.'nin hazırlanmış olduğu test problemleridir. Bu problemlerin AKARP şeklinde hazırlanmış olanlarına <http://140.113.119.114/network/OVRP/ovrp.html> adresinden erişilebilmektedir. Jen ile başlayan problemler ise bu çalışmada türetilen problemlerdir ve jenerik tabirini simgelemesi için jen kısaltmasıyla isimlendirilmiştir. Jen tipi problemler p tipi problemler temel alınarak türetilmişlerdir. Probleme toplama için rassal talep değerleri eklenerek literatürdeki test problemlerinden üretilmiştir. 2. grup problemler için (uk ve p tipi) türetilen heterojen filoya ait özellikler EK-A'da, 3. grup problemler için (jen tipi) türetilen toplama talepleri ise EK-B'de verilmiştir. Test problemlerine ait diğer bilgiler zaten ilgili web adreslerinde mevcuttur.

Tüm test problemlerinde serimlerde yer alan düğümlerin koordinatları iki boyutlu Öklid düzlemi üzerinde yer almaktadır ve i düğümüne ait apsüs ve ordinat değerleri sırasıyla x_i ve y_i olmak üzere tüm $x_i, y_i \in Z^+$ dir.

Test problemlerinin çözümünde bütün problemler karşılaştırma yapabilmek ve enerji enküçüklemeli çözüm bulunduğunda ne kadar avantaj sağlandığını gösterebilmek için hem enerji enküçüklemeli hem de mesafeyi enküçüklemeli şeklinde 2 farklı biçimde çözülmüştür. Bütün problemlerin eniyi çözümleri bulunmuştur. Jen tipi problemler hem dağıtım hem de toplamayı bir arada ele aldığı için eniyi çözümü bulmada en çok zorlanılan grup olmuştur. Bu nedenle jen tipi problemler önce mesafe enküçüklemeli olarak çözülmüş, elde edilen eniyi çözüme karşı gelen enerji miktarı hesaplanmış ve enerji enküçüklemeli model çözülmenden önce bu değer başlangıç üst sınır değeri olarak verilmiştir. Böylece problemlerin çözüm sürecinde dal sınır algoritmasına hız kazandırılmıştır.

2. AMAÇ FONKSİYON DEĞERLERİ VE ÇÖZÜM SÜRELERİNE İLİŞKİN HESAPSAL SONUÇLAR

Çalışmanın temel amacı, enerji enküçüklemeli, heterojen filolu ve hem dağıtım hem de toplamayı yapabilen araç rotalarını bulmak olduğu için 1. grup test problemlerinin (kapalı turlu, homojen filolu mesafe enküçüklemeli problemler) çözümlerine dair hesapsal sonuçlar verilmemiştir. Bunun yerine doğrudan 2. ve 3. grup test problemlerine dair sonuçlar verilmiştir. Tablo-3'te 2. grup test problemlerinin toplu sonuçları vardır. Bu tabloda HFAARP heterojen filolu açık araç rotalamalı ve mesafe enküçüklemeli problemi, AKERP ise enerji enküçüklemeli problemi simgelemektedir.

#	Ad	HFAARP			AKERP			Mesafe Değişimi	Enerji Değişimi
		Tur Uzunluğu (m)	Harcanan Enerji (joule)	Çözüm Süresi (saniye)	Tur Uzunluğu (m)	Harcanan Enerji (joule)	Çözüm Süresi (saniye)		
1	uk_10_01	244410	275682984	0,219	270340	241283296	3,338	10,61%	-12%
2	uk_10_02	364540	394666363	0,624	364540	374794763	77,127	-	-5%
3	uk_10_03	328130	363342495	0,873	328130	298290910	7,582	-	18%
4	uk_10_04	323780	348148866	0,281	323780	254121809	4,680	-	-27%
5	uk_10_05	301060	324757595	0,330	308850	299861610	3,027	2,59%	-8%
6	uk_10_06	421570	440242399	0,397	425020	395480006	4,976	0,82%	-10%
7	uk_10_07	362920	379174274	0,452	362920	361159466	1,935	-	-5%
8	uk_10_08	423320	466047831	0,297	423320	328392071	1,326	-	-30%
9	uk_10_09	294070	312359452	0,343	294070	276733379	0,842	-	-11%
10	uk_10_10	321170	350300667	0,296	321170	245862181	1,061	-	-30%
11	uk_10_11	540060	579790546	0,842	540060	508096190	1227,228	-	-12%
12	uk_10_12	293200	308331518	0,281	293200	288399769	1,045	-	-6%

13	uk_10_13	362290	394507605	0,312	367610	337802616	7,831	1,47%	-14%
14	uk_10_14	320180	339455088	0,296	320180	235338531	1,030	-	-31%
15	uk_10_15	195680	219314167	0,285	211170	193954248	3,151	7,92%	-12%
16	uk_10_16	250310	300294293	1,092	250330	215226131	4,087	0,01%	-28%
17	uk_10_17	295931	314936179	0,453	295931	298704944	1,748	-	-5%
18	uk_10_18	281990	302398672	0,796	293050	285977751	9,844	3,92%	-5%
19	uk_10_19	310130	333782659	0,390	345520	256086669	25,163	11,41%	-23%
20	uk_10_20	244070	268119828	0,234	244070	228752822	1,123	-	-15%
21	p_n19_k2	183690	440033948	11,575	184144	432656768	159,916	0,25%	-2%
22	p_n20_k2	181481	549958409	8,622	181481	490944291	569,139	-	-11%
23	p_n21_k2	189616	576076192	6,942	190232	508506817	676,654	0,33%	-12%
24	p_n22_k2	194475	593968684	16,302	196739	519365397	749,949	1,16%	-13%

Tablo – 3 : Seçilen Test Problemlerinin Açık Turlu Dağıtım Çözümleri

Tablo – 3'te, ilk iki sütun sırasıyla test probleminin numarası ve adını göstermektedir. Daha sonra yer alan 3 sütun, kat edilen toplam mesafeyi enküçükleyecek şekilde çözülen heterojen filolu açık turlu klasik ARP'nin sırasıyla amaç fonksiyon değerini, bu değere karşılık gelen enerji miktarını ve çözüm süresini göstermektedir. Takip eden 3. sütun ise harcanan toplam enerjiyi enküçükleyecek şekilde çözülen heterojen filolu açık turlu AKERP'nin yine sırasıyla amaç fonksiyon değerini, bu değere karşılık gelen enerji miktarını ve çözüm süresini göstermektedir. Son iki sütun ise AKERP ile HFAARP arasında uygun turlar açısından sırasıyla kat edilen toplam mesafe ve harcanan enerji bakımından değişimi göstermektedir. Bu değerlerin pozitif olması önerilen modelin öncekinden daha kötü, negatif olması ise öncekinden daha iyi değer bulunduğunu göstermektedir. Örneğin 1 numaralı test probleminde önerilen model ile elde edilen turun uzunluğu % 10,61 artarken, harcanan enerji miktarı %12 azalmaktadır.

Tablo – 3 incelendiğinde, çözülen 24 adet test probleminin 11'inde kat edilen toplam mesafede bir artış olmasına karşın harcanan enerji miktarında ortalama %12,66 azalma görülmektedir. Buna karşılık mesafedeki artış %3,68 kadardır.

Tablo – 4'te, 3. grup test problemlerinin (hem toplama hem de dağıtım yapılan) toplu sonuçları verilmiştir. Bu tabloda HFAARP yine heterojen filolu açık araç rotalamalı ve mesafe enküçüklemeli problemi, AKERP ise enerji enküçüklemeli problemi simgelemektedir. Burada her iki

problem için kısıtların tamamen aynı olduğu ve sadece amaç fonksiyonları açısından fark olduğu unutulmamalıdır.

#	Ad	Tur Uzunluğu (m)	HFAARP		Tur Uzunluğu (m)	AKERP		Mesafe Değişimi	Enerji Değişimi
			Harcanan Enerji (joule)	Çözüm Süresi (saniye)		Harcanan Enerji (joule)	Çözüm Süresi (saniye)		
33	jen_n6_k2	269480	975049616	1,357	273820	873736160	0,874	2%	-10%
28	jen_n10_k3	305862	1188086735	5,944	307151	1068274888	23,712	0%	-10%
27	jen_n12_k4	435181	1717255711	165,065	447969	1525510487	86,893	3%	-11%
34	jen_n15_k4	262122	997047140	443,916	263134	896123386	437,801	0%	-10%
25	jen_n17_k5	457522	1707895829	31617,170	464959	1492369420	56160,180	2%	-13%
30	jen_n17_k6	448716	1603449545	103,476	455987	1417433834	368,224	2%	-12%
31	jen_n18_k6	511955	1903949089	69510,720	516192	1711985302	202878,610	1%	-10%
29	jen_n20_k5	570850	2199844955	13036,520	574970	1965181284	90880,960	1%	-11%

Tablo – 4 : Türetilen Test Problemlerinin Açık Turlu Dağıtım ve Toplama Çözümleri

Tablo – 4’te, ilk iki sütun sırasıyla test probleminin numarası ve adını, daha sonra yer alan 3 sütun, kat edilen toplam mesafeyi enküçükleyecek şekilde çözülen heterojen filolu açık turlu dağıtım toplamalı klasik ARP’nin sırasıyla amaç fonksiyon değerini, bu değere karşılık gelen enerji miktarını ve çözüm süresini göstermektedir. Takip eden 3. sütun ise harcanan toplam enerjiyi enküçükleyecek şekilde çözülen heterojen filolu açık turlu dağıtım toplamalı AKERP’nin sırasıyla kat edilen toplam mesafe değerini, amaç fonksiyon değeri olan harcanan enerji miktarını ve çözüm süresini göstermektedir. Son iki sütun ise AKERP ile HFAARP arasında uygun turlar açısından sırasıyla kat edilen toplam mesafe ve harcanan enerji bakımından değişimi göstermektedir.

Tablo – 4 incelendiğinde, çözülen 8 adet test probleminde kat edilen toplam mesafedeki artışın en çok %3 seviyesinde ve ortalama %1,375 olarak kaldığı görülürken harcanan enerji miktarında ortalama %10,62 azalma görülmektedir. Bu ciddi bir farktır. Sonuç olarak daha ağır yüklü araçlar ile kat edilen toplam mesafelerdeki ufak değişimlerle bile harcanan enerji miktarına ve dolayısıyla tüketilen yakıt miktarında ciddi kazançlar elde edilebildiği görülmektedir. Öte yandan çözüm süreleri incelendiğinde araç sayısı 5’e çıkarıldığında çözüm sürelerinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Örneğin jenerik problemlerden 5 ve 6 araçlı problemlerin ortalama çözüm süresi 87572 saniyedir. Bu süre 24 saatten biraz fazladır. Ancak özellikle

mühimmat ve silah sistemleri gibi ikmali günlük olarak yapılmayan, 15 gün ila 30 gün arasında değişen periyotlarla ikmali yapılan bu ağır malzemelerin taşınmasında elde edilen bu çözüm süreleri kabul edilebilir niteliktedir. Daha kısa sürede çözüm bulunması istenen problemler için elbette başka önlemler almak gerekecektir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada açık rotalı, heterojen filolu, hem taşıma hem de toplamının olduğu kirliliği en küçükleyen araç rotalarını belirleme problemi tanımlanmış ve çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin test edilebilmesi için literatürden alınan test problemleri geliştirilerek yeni test problemleri türetilmiştir. Model, heterojen filolu, açık rotalı ve sadece dağıtımın söz konusu olduğu 24 ayrı test probleminde denenmiş ve kat edilen mesafede ortalama olarak %3,68 artış olurken harcanan enerji miktarında ortalama %12,66 azalma görülmüştür. Benzer şekilde heterojen filolu, açık rotalı ve hem dağıtımın hem de toplamının söz konusu olduğu 8 farklı test probleminde kat edilen toplam mesafedeki artış ortalama %1,375 iken harcanan enerji miktarında ortalama %10,62 azalma görülmüştür. Özellikle ağır malzeme taşınmasında harcanan enerjinin az olması kirliliğin de az olması anlamına geldiği için elde edilen bu sonuçlar çevre duyarlılığı ve enerji korunumu açısından önemlidir.

Önerilen modelin iki önemli üstünlüğü alt tur engelleme kısıt gerektirmemesi ve hem dağıtım hem de toplamayı bir arada ele alarak bütünsel eniyiyi verebilmesidir. Bunun yanı sıra küçük bir eklentiyle çok merkezli yapıya dönüştürülmesi de mümkündür. Çalışmada çözölen en büyük iki problemin boyutları 20 düğüm 5 araçlı problem ile 18 düğüm 6 araçlı problemdir. Bu boyutların küçük olduğu düşünölebilir. Ancak yapılan ön çalışma sonrasında silahlı kuvvetler bünyesinde yapılacak ağır malzeme taşınması işinde, en çok 15 düğümlü bir serimle karşılaşıldığı belirlenmiştir. Bu açıdan şu anda çözülebilen problem boyutları, doğrudan doğruya silahlı kuvvetler bünyesinde uygulanabilecek niteliktedir. Üstelik problemle sık karşılaşılmadığı için test problemlerinin çözümünde karşılaşılan 24 saatlik çözüm süresi de kabul edilebilir değerdedir. Ayrıca daha iyi bilgisayar olanakları ile daha kısa sürede çözüm bulunacağı yahut daha büyük boyutlu problemlerin çözülebileceğı de açıktır.

Bütün bunlara rağmen bilimsel açıdan daha büyük boyutlu problemlerin de çözülebilmesine olanak sağlayacak bazı önerilerin getirilmesi gerekir. Bu açıdan 3 önemli öneri getirilebilir. Bunların ilki eniyi çözümü araştıran dal-sınır algoritmasını hızlandıracak bazı düzenlemeler yapmaktır. Örneğin en yakın komşuluk sezgiseli gibi basit ve açgözlü bir sezgisel algoritma ile iyi bir başlangıç çözüm bulmak ve bu çözümün amaç fonksiyonu değerini bir üst sınır değeri olarak CPLEX çözücüsüne girmek, çözüm sürecini hızlandıracaktır. Üst sınır değerinin kalitesi artıkça çözüm süresinin azalacağı açıktır. Bu nedenle ne kadar iyi bir başlangıç çözüm bulan algoritma kullanılırsa o kadar iyi olacaktır. Ayrıca bu probleme özel bir dal ve kesme algoritmasının geliştirilmesi de önerilebilir.

İkinci öneri problemi bütünleşik olarak çözmek yerine 2 aşamalı olarak çözmek olabilir. Bu durumda bütünsel eniyi elde edilemeyecektir ama hem taşıma hem de toplama için problem ayrı ayrı çözümlenerek oldukça iyi bir çözüm elde etmek şansı vardır. Problemi bütünsel çözmek yerine 2 aşamalı çözmenin, bütünsel eniyiden ne kadar feragat edildiğine dair deneysel çalışmalar yapmak, bu yöntemin tercih edilip edilmemesi konusunda iyi bir fikir verecektir.

Üçüncü öneri ise ileri sezgisel algoritmalarından birini kullanarak problem için kısa sürede iyi bir çözüm bulmak olabilir. Genetik algoritma, yasaklı arama ve yapay bağışıklık sistemi ile parçacık sürüsü gibi evrimsel algoritmalar bu problemi çözmekte uygun olabilecek ileri sezgisel algoritmalarlardır.

Çözüm yöntemleri haricinde son bir öneri de ağır malzeme taşınması işinin sık yaşandığı bir işletme için karar destek sistemini kurulması olabilir. Özellikle problemin hangi algoritmayla, hangi boyuta kadar çözülebileceği belirlendikten sonra uygun bir karar destek sistemi oluşturularak problemin verilen senaryolara göre çözümlerini verecek bir karar destek sistemi geliştirmek, işletmedeki karar verme etkinliğini arttıracaktır. Bu karar destek sisteminin Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla yollara dair eğim bilgilerini de probleme katması; daha gerçekçi sonuçlar bulunmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

AHUJA, R.K., T. L. MAGNANTI, J. B. ORLIN. **Network Flows: Theory and Algorithms and Applications**, Printice Hall, New Jersey, 864sf., 1993.

AKÇELİK, Rahmi. **"Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management"**, Australian Road Research Board Report 124, Canberra, 1982.

AKSEN, D., Z. ÖZYURT, N. ARAS. **"Open Vehicle Routing Problem with Driver Nodes and Time Deadlines"**, Journal of the Operational Research Society 58, 1223 –1234, 2007.

BARTH, M., F. AN, T. YOUNGLOVE, G. SCORA, C. LEVINE, M. ROSS, T.VENDEL. **"Comprehensive Modal Emission (CMEM), Version 2.0 User Guide"**, Technical Report, 2000.

BARTH, M., K. BORIBOONSOMSIN. **"Energy and Emissions Impacts of a Freeway-Based Dynamic Eco-Driving System"**, Transportation Research Part D 14 (6), 400–410, 2009.

BEKTAŞ, T., G. LAPORTE. **"Pollution Routing Problem"**, Transportation Research Part B, 45, 8, 1232-1250, 2011.

BEKTAŞ, T., S. ELMASTAŞ. **"Solving School Bus Routing Problems Through Integer Programming"**, Journal of the Operational Research Society, 58:1599-1604, 2007.

BOWYER, D. P., R. AKÇELİK, D. C. BIGGS. **"Guide to Fuel Consumption Analysis for Urban Traffic Management"**, Australian Road Research Board Transport Research 32, 21, 6, 485p, 1985.

BRANDAO, Jose. **"A Tabu Search Algorithm for The Open Vehicle Routing Problem"**, European Journal of Operational Research 157: 552–64, 2004.

BULUT, E., A. DERAN. **"Ters Lojistik ve Şirketlerin Maliyet Yönetimi Üzerine Etkisi"**, Ekonomik Yaklaşım, Cilt:19, Özel Sayı, 325-344, 2008.

CORDEAU, J. F., M. GENDREAU, G. LAPORTE. **"A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Problems"**, Networks, 30: 105-119, 1997.

DEFRA. **"The Social Cost of Carbon and The Shadow Price Of Carbon: What They Are, and How To Use Them in Economic Appraisal in The UK."**, Tech. rep., Department for Environment, Food, and Rural Affairs – Economics Group.
[http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/what we do/lc uk/valuation/shadow % price/shadow price.aspx](http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/what_we_do/lc_uk/valuation/shadow_price/shadow_price.aspx) 2007.

DEMİR, E., T. BEKTAŞ, G. LAPORTE. **"A Comparative Analysis of Several Vehicle Emission Models for Road Transportation"**, Transportation Research Part D, 16, 347-357, 2011.

DIJKSTRA, Edsger W. **"A Note on Two Problems in Connection With Graphs"**, Numerische Mathematik, 1, 269-271, 1959.

DRUMMOND, L.M.A., L. S. OCHI, D. S. VIANNA. **"An Asynchronous Parallel Metaheuristic for The Period Vehicle Routing Problem"**, Future Generation Computer Systems, 17: 379-386, 2001.

EDMONDS, J., E. L. JOHNSON. **"Matching, Euler Tours and The Chinese Postman"**, Mathematical Programming, 5, 1, 88-124, 1973.

EISELT, H. A. **Arc Routing: Theory, Solutions and Applications**, Boston, Kluwer Academic Publishers, 512sf, 2000.

ERWIN, Sandra I. **"Army's Next Battle: Fuel, Transportation Costs"**, http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2002/April/Pages/Armys_Next4086.aspx, 2002.

FLESZAR, K., I. H. OSMAN, K. S. HINDI. **"A Variable Neighbourhood Search Algorithm for The Open Vehicle Routing Problem"**, European Journal of Operational Research, 195: 803–9, 2009.

FORKENBROCK, David J. **"Comparison of External Costs of Rail and Truck Freight Transportation"**, Transportation Research Part A 35 (4), 321–337, 2001.

FU, Z., R. EGLESE, L. LI. **"A New Tabu Search Heuristic For The Open Vehicle Routing Problem"**, Journal of the Operational Research Society, 56: 267–74, 2005.

GENCER, C., S. ÇETİN, E. ÖZKÜTÜK. **"Heterojen Araç Filolu Eş Zamanlı Dağıtım-Toplamalı Araç Rotalama Problemi İçin Bir Karar Destek Sistemi"**, International Journal of Research and Development, Vol.3, No.1, 2011.

GRIBKOVSKAIA, I., Sr. Q HALSKAU, G. LAPORTE. **"The Bridges of Königsberg-A Historical Perspective"**, Networks, 49, 3, 1707-1783, 2007.

GROSS, J.L., J. YELLEN. **Handbook of Graph Theory**, CRC Press, Boca Raton, 1115sf., 2004.

GUTIN, G., A. P. PUNNEN. **The Travelling Salesman Problem and its Variations**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 38sf. 2004.

HICKMAN, A. John. **"Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption"**, METT Project, 1999.

IOANNOU, G., M. KRITIKOS. **"A Synthesis of Assignment and Heuristic Solutions for Vehicle Routing with Time Windows"**, Journal of the Operational Research Society, 55(1): 2-11,2004.

IOMA İnternet sitesi, Global, www.ioma.com/global, 2007

KALAY, Semih. **"Charting The Future of Heavy Haul"**, Transportation Technology Center Inc's Vice-President of Research & Development, Railway Gazette International, 03735346, Cilt 165, Sayı 8, 2009.

KARA, I., B. Y. KARA, M. K. YETİŞ. **"Energy Minimizing Vehicle Routing Problem, Combinatorial Optimization and Applications"**, Proceedings 1st

International Conference on Combinatorial Optimization and Applications, Xian, ÇİN, 2007.

KNÖRR, W. **"EcoTransIT: Ecological Transport Information Tool – Environmental Methodology and Data"**, Tech. rep., Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg, 2008.

KRESS, Moshe. **"Optimizing Supply Chains in Military Operations"**, <http://www.ima.umn.edu/talks/workshops/9-23-27.2002/kress/kress.ppt>, 2005.

LARSEN, J., J. CLAUSEN. **Supplementary Notes to Networks and Integer Programming**, Kongens Lyngby, 193sf. 2009.

LENSTRA, J. K., K. RINNOOY. **"On General Routing Problems"**, Networks, 6, 3, 273-280, 1976.

LETCHFORD, A.N., J. LYGGAARD, R. W. EGGLESE. **"A Branch-and-Cut Algorithm for The Capacitated Open Vehicle Routing Problem"**, Journal of the Operational Research Society, 58: 1642–51, 2007.

LI, F., B. GOLDEN, E. WASIL. **"The Open Vehicle Routing Problem: Algorithms, Large-scale Test Problems, and Computational Results"**, Computers and Operations Research, 34: 2918–30, 2007.

LI, X., P. TIAN. **"An Ant Colony Optimization Metaheuristic Hybridized with Tabu Search for Open Vehicle Routing Problems"**, Journal of the Operational Research Society, 60: 1012–25, 2009.

MATHEMATICA-JOURNAL Internet Sitesi, <http://www.mathematica-journal.com/issue/v11i3/contents/superhamilton/superhamilton.pdf>, 2012.

McKINNON, A. **"CO₂ Emissions from Freight Transport in the UK"**, Tech. rep., Prepared for the Climate Change Working Group of the Commission for Integrated Transport, Londra, İngiltere, 2007.

NGUEVEU, S. U., C. PRINS, R. W. CALVO. **"An Effective Algorithm for the Cumulative Vehicle Routing Problem"**, Computers & Operations Research, 37, 11, 1877-1885, 2010.

NTZIACHRISTOS, L., Z. SAMARAS. **"COPERT III Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport: Methodology and Emission Factors (Version 2.1)"**, Technical Report. European Environment Agency, Kopenhag, Danimarka, 2000.

OHNISHI, H. **"Greenhouse Gas Reduction Strategies in the Transport Sector: Preliminary Report"**, Tech. rep., OECD/ITF Joint Transport Research Centre Working Group on GHG Reduction Strategies in the Transport Sector, OECD/ITF, Paris, 2008.

PAPADIMITRIOU, Christos H. **"On the Complexity of Edge Traversing"**, Journal of the Association for Computing Machinery, 23, 3, 544-554, 1976.

PISINGER, D, S. ROPKE. **"A General Heuristic for Vehicle Routing Problems"**, Computers and Operations Research, 34: 2403-35, 2007.

REES, W. G. **"Least-cost Paths in Mountainous Terrain"**, Computers & Geosciences, 30, 203-209, 2004.

REPOUSSIS, P.P., C. D. TARANTILIS, O. BRAYSY, G. IOANNOU. **"A Hybrid Evolution Strategy for The Open Vehicle Routing Problem"**, Computers and Operations Research, 37 (3): 443-455, 2010.

ROGERS, D., S. TIBBEN-LEMBKE. **"Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices"**, <http://www.rlec.org/reverse.pdf>, 1998.

RUSSELL, R., W-C. CHIANG, D. ZEPEDA. **"Integrating Multi-product Production and Distribution in Newspaper Logistics"**, Computers and Operations Research, 35: 1576-88, 2008.

SARIKLIS, D., S. POWELL. **"A Heuristic Method for The Open Vehicle Routing Problem"**, Journal of the Operational Research Society, 51: 564-73, 2000.

SBIHI, A., R. W. EGLESE. **"Combinatorial Optimization and Green Logistics"**, Ann Oper Res 175: 159–175, 2010.

TARANTILIS, C., D. DIAKOULAKI, C. KIRANOUDIS. **"Combination of Geographical Information System and Efficient Routing Algorithms for Real Life Distribution Operations"**, European Journal of Operational Research, 152: 437–53, 2004.

TARANTILIS, C., C. KIRANOUDIS. **"Distribution of Fresh Meat"**, Journal of Food Engineering, 51: 85–91, 2002.

TAVARES, G., Z. ZSIGRAIOVA, V. SEMIAO, M. G. CARVALHO. **"Optimisation of MSW Collection Routes for Minimum Fuel Consumption Using 3D GIS modelling"**, Waste Management, 29, 1176–1185, 2009.

TOL, Richard S. J. **"The Marginal Damage Costs of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment of The Uncertainties"**, Energy Policy, 33 (16), 2064–2074, 2005.

TOTH, P., D. VIGO. **The Vehicle Routing Problem (Monographs on Discrete Mathematics and Applications)**, SIAM, 367sf., 2001.

TSANG, K.S., W. T. HUNG, C. S. CHEUNG. **"Emissions and Fuel Consumption of a Euro 4 Car Operating Along Different Routes in Hong Kong"**, Transportation Research Part D, 16, 415–422, 2011.

TÜFEKÇİLER, Hakan. **"İki Amaçlı Açık Araç Rotalama Problemi İçin Bir Çözüm Yaklaşımı"**, (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-18, 2008.

WIKIPEDIA İnternet Sitesi, Königsberg' in yedi köprüsü , http://tr.wikipedia.org/wiki/Königsberg'in_yedi_köprüsü, 2012.

WIKIPEDIA İnternet Sitesi, Truck_classification, <[http:// en.wikipedia.org /wiki/ Truck_classification](http://en.wikipedia.org/wiki/Truck_classification)>, 2012.

YONG, P., W. XIAOFENG. **"Research on a Vehicle Routing Schedule to Reduce Fuel Consumption"**, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, China, 825-827, 2009.

EKLER

EK-A : 2. GRUP PROBLEMLER İÇİN (UK VE P TİPİ) TÜRETİLEN
HETEROJEN FİLOYA AİT ÖZELLİKLER

EK-B : 3. GRUP PROBLEMLER İÇİN (JEN TİPİ) TÜRETİLEN TOPLAMA
TALEPLERİ

EK-C : JEN_N10_K3 PROBLEMİ VERİLERİ

**2. GRUP PROBLEMLER İÇİN (UK VE P TİPİ) TÜRETİLEN
HETEROJEN FİLOYA AİT ÖZELLİKLER**

#	Ad	Araç Kapasiteleri (kg)	
		1	2
1	uk_10_01	6150	6550
2	uk_10_02	6150	6550
3	uk_10_03	6150	6550
4	uk_10_04	6150	6550
5	uk_10_05	6150	6550
6	uk_10_06	6150	6550
7	uk_10_07	6150	6550
8	uk_10_08	6150	6550
9	uk_10_09	6150	6550
10	uk_10_10	6150	6550
11	uk_10_11	6050	6650
12	uk_10_12	6050	6650
13	uk_10_13	6050	6650
14	uk_10_14	6050	6650
15	uk_10_15	6050	6650
16	uk_10_16	6050	6650
17	uk_10_17	6050	6650
18	uk_10_18	6050	6650
19	uk_10_19	6050	6650
20	uk_10_20	6050	6650
21	p_n19_k2	150000	170000
22	p_n20_k2	150000	170000
23	p_n21_k2	140000	180000
24	p_n22_k2	140000	180000

3. GRUP PROBLEMLER İÇİN (JEN TİPİ) TÜRETİLEN TOPLAMA TALEPLERİ

#	Ad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
35	jen_n6_k2	0	4000	6340	2110	6580	6300														
30	jen_n10_k3	0	8580	3210	6310	2890	4750	5640	6140	3320	2180										
29	jen_n12_k4	0	8460	130	6670	5200	6690	7980	5020	6380	4160	3970	3200								
34	jen_n15_k4	0	6150	7500	3000	3200	3000	3210	3200	3000	2800	4700	3100	2850	5450	6100					
27	jen_n17_k5	0	7300	2850	5450	6100	6150	7500	3000	3200	3000	2800	4300	6900	4700	3100	2000	3250			
32	jen_n17_k6	0	7300	2850	5450	6100	6150	7500	3000	3200	3000	2800	4300	6900	4700	3100	2000	3250			
33	jen_n18_k6	0	6420	3380	9200	4000	6500	3900	6800	7700	5000	4100	5170	3000	2800	7460	6900	4700	3100		
31	jen_n20_k5	0	5900	4890	6350	5400	5120	2200	4280	3360	3970	3350	1970	5200	190	3100	6800	2200	2650	2870	4430

JEN_N10_K3 PROBLEMİ VERİLERİ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	H
Dağıtım Talep Miktarları (kg)	0	9200	4000	6500	3900	6800	7700	5000	4100	2800	0
Toplama Talep Miktarları (kg)	0	8580	3210	6310	2890	4750	5640	6140	3320	2180	0
Araç kapasiteleri (kg)	16000	17000	20000								
Araç ağırlıkları (kg)	16500	18000	21200								

UZAKLIK MATRİSİ														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	H		
Araç Ön Yüz Alanı	10,5	m ²	1	0,00	23,54	23,02	18,03	32,56	19,21	30,00	35,61	45,28	27,02	5000,00
Aerodinamik Sabit	4,42506		2	23,54	0,00	30,00	34,48	39,62	14,87	13,04	23,02	64,56	49,19	0,00
Çekiş Katsayısı	0,7		3	23,02	30,00	0,00	12,04	10,30	15,26	25,50	23,54	38,00	44,72	0,00
Direnç Katsayısı	0,01		4	18,03	34,48	12,04	0,00	17,46	22,00	34,13	34,54	30,08	33,84	0,00
Yerçekimi Sabiti	9,81	m/s ²	5	32,56	39,62	10,30	17,46	0,00	24,76	33,11	28,28	34,21	51,24	0,00
Hava yoğunluğu	1,2041	kg/m ³	6	19,21	14,87	15,26	22,00	24,76	0,00	12,37	16,40	51,62	45,97	0,00
Eğim	0	derece	7	30,00	13,04	25,50	34,13	33,11	12,37	0,00	10,20	63,20	57,01	0,00
Hız Alt Limiti	41	km/sa	8	35,61	23,02	23,54	34,54	28,28	16,40	10,20	0,00	61,20	62,24	0,00
Hız Üst Limiti	90	km/sa	9	45,28	64,56	38,00	30,08	34,21	51,62	63,20	61,20	0,00	43,86	0,00
			10	27,02	49,19	44,72	33,84	51,24	45,97	57,01	62,24	43,86	0,00	0,00
			H	5000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Dağıtım										Toplama
	1. araç	1	4	3	5	11	11	5	3	4	1
HFAARP	1. araç	1	4	3	5	11	11	5	3	4	1
UYGUN TURLAR	2. araç	1	2	10	9	11	11	9	10	2	1
	3. araç	1	6	7	8	11	11	8	7	6	1
Kat Edilen Mesafe (m)	198740							198740			
Harcanan Enerji (joule)	650703004,5							623687402,5			
TOPLAM	397480										
					m						
					joule						
	1274390407										

AKERP	1. araç	1	2	3	10	11	10	2	1		
	2. araç	1	4	5	9	11	9	5	3	4	1
3. araç	1	6	7	8	11	11	8	7	6	1	

Kat Edilen Mesafe (m)	398830										
Harcanan Enerji (joule)	1246044682										

Mesafe değişim : 0,340%
Enerji değişim : -2,224%