

**TERÖR BÖLGELERİNE YAPILAN ASKERİ SEVKİYATLAR İÇİN
YER SEÇİMİ VE HAT ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA
PROBLEMİ**

Cihan ÇETİNKAYA

**DOKTORA TEZİ
KAZALARIN ÇEVRESEL VE TEKNİK ARAŞTIRMASI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2014
ANKARA**

Cihan ÇETİNKAYA tarafından hazırlanan “TERÖR BÖLGELERİNE YAPILAN ASKERİ SEVKİYATLAR İÇİN YER SEÇİMİ VE HAT ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Kazaların Çevresel Ve Teknik Araştırması Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Ali AKÇAYOL
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Uğur ÖZCAN
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Ahmet Kürşad TÜRKER
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, K.K.Ü.

Yrd. Doç. Dr. İsmail KARAOĞLAN
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, S.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 12/03/2014

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Cihan ÇETİNKAYA

**TERÖR BÖLGELERİNE YAPILAN ASKERİ SEVKİYATLAR İÇİN
YER SEÇİMİ VE HAT ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA
PROBLEMİ
(Doktora Tezi)**

Cihan ÇETİNKAYA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2014

ÖZET

Günümüzün rekabetçi ortamında, firmaların ayakta kalabilmeleri için stratejik seviyede kararlar vermeleri gerekir. Bu kararlardan en önemlisi de müşteri ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tesislerin yerlerinin ve hangi müşterinin hangi tesisten nasıl hizmet göreceğinin belirlenmesidir. Bu tez kapsamında ele alınan Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi terör nedeniyle yolların belirli saatler içerisinde kullanılması ya da köprülerin sadece belirli saatler dahilinde kamyon, tır vs. gibi taşıma araçları için geçiş izni vermesi gibi durumlar sebebiyle, zaman penceresinin düğümler yerine hatlar (yollar) üzerinde mevcut olduğu bir problem tipidir. Gerçek hayatta karşılaşılan Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (HZZP_YSARP) literatürde daha önce çalışılmamış olması nedeniyle bu tez kapsamında ilk kez ele alınmış, problemin tanımı ve varsayımları ortaya konularak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çeşitli geçerli eşitsizliklerin eklenmesi ve bazı kısıtların gevşetilmesi suretiyle matematiksel model kuvvetlendirilerek farklı matematiksel modeller elde edilmiş, geliştirilen matematiksel modellerin performansı test problemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde optimal çözüme çok kısa süre içerisinde çok yakın sonuçlar üreten bir matematiksel model çözüm yöntemi olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.148
Anahtar Kelimeler : Hat zaman pencereli araç rotalama problemi,
matematiksel model, tesis yer seçimi
Sayfa Adedi : 37
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

**PLANT LOCATION AND VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH ARC
TIME WINDOWS FOR MILITARY SHIPMENT TO TERROR REGION**

(Phd. Thesis)

Cihan ÇETİNKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2014

ABSTRACT

In today's competitive environment, the companies have to make strategic level decisions to survive and make profit. One of the most important decisions is to determine the facility locations and the distribution of goods to customers so as to meet the customer demands. This thesis examines the Plant Location and Vehicle Routing Problem with Arc Time Windows, which emerges from the need of "safe transportation" against terrorism and limited arc time windows on bridges for transfer vehicles like trucks and articulated lorries. The time windows are not on the nodes but on the arcs. To the best of our knowledge; this real life problem "Plant Location and Vehicle Routing Problem with Arc Time Windows" has never been studied in the literature, so the problem is described, assumptions are set and a mathematical model is developed to solve this problem. Different mathematical models are developed by adding new valid inequalities and applying relaxations. The quality of all solution approaches is measured by using the test problems in the literature and a mathematical model which gives very good solutions for large scale problems in a short computation time is determined as the solution method.

Science Code	: 906.1.148
Key Words	: Vehicle routing problem with arc time windows, mathematical model, plant location
Page Number	: 37
Adviser	: Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım ve meslek hayatım boyunca değerli yardım ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kıymetli fikir, deneyim ve yönlendirmeleri sayesinde tez çalışmalarımın olgunlaşmasına, çalışmalara bakış açımın değişmesine çok büyük katkısı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail KARAOĞLAN'a, akademik kariyerime verdiği destek sayesinde beni ayakta tutan Sayın Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN'e ve tez izleme komitemde yer almak suretiyle her zaman daha iyiyi hedef olarak belirlememe yardımcı olan Sayın Prof. Dr. M. Ali AKÇAYOL, Sayın Doç. Dr. Uğur ÖZCAN hocalarıma sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca sabır ve metanetle her zaman yanımda olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ	5
2.1. Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi	6
2.2. Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi	6
2.3. Hat Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi	7
3. HAT ZAMAN PENCERELİ YER SEÇİMİ VE ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ.....	8
3.1. Problem Tanımı.....	8
3.2. Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi ile İlgili Kaynak Araştırması.....	9
3.3. Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi İçin Önerilen Matematiksel Model.....	14
4. GEÇERLİ EŞİTSİZLİKLER	18
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
5.1. Test Problemleri	20
5.2. Deneysel karşılaştırmalar	23

Sayfa

6. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR	32
ÖZGEÇMİŞ	37

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Matematiksel modelin problem parametreleri üzerindeki etkisi	24
Çizelge 5.2. Doğrusal gevşetme (DG_1) ile elde edilen sonuçlar	26
Çizelge 5.3. Kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin doğrusal gevşetmesi (DG_2) ile elde edilen sonuçlar	27
Çizelge 5.4. Kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin kısmi doğrusal gevşetmesi (KDG) ile elde edilen sonuçlar	29

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Örnek bir ARP çözümü.....	5
Şekil 2.2. Örnek bir HZ_ARP şebekesi	7

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simge ve kısaltmalar açıklamaları ile aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklama
a_{ij}	(i, j) hattının kullanılabileceği en erken zaman
b_{ij}	(i, j) hattının kullanılabileceği en geç zaman
C_{dk}	depo kapasitesi
c_{ij}	i, j ayrıtının (hat, yol) uzunluğu $(\forall i, j \in N)$
C_v	araç kapasitesi
d_i	i müşterisinin talebi $(\forall k \in K)$
FD_k	sabit kurulum maliyeti
M	büyük bir sayı
N	tüm düğümler kümesi $(N = I \cup J \cup K)$
N_c	müşteri kümesi
No	potansiyel depo kurulum noktaları
t_{ij}	i, j ayrıtının (hat, yol) uzunluğu $(\forall i, j \in N)$

Kısaltmalar	Açıklama
ARP	Araç Rotalama Problemi
BAE	Bal Arısı En İyilemesi
EÇUPS	En İyi Çözüme Ulaşılan Problem Sayısı
DG1	Doğrusal Gevşetme
DG2	Kuvvetlendirilmiş Doğrusal Gevşetme
GKA	Genişletilmiş Komşu Arama
GYSD	Gevşetilmiş Yüzde Sapma Değeri
HZP_ARP	Hat Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi
HZP_YSARP	Hat Zaman Pencereli Yer Seçimi Ve Araç Rotalama Problemi

Kısaltmalar	Açıklama
KDG	Kısmi Doğrusal Gevşetme
KSE	Kuş Sürüsü En İyilemesi
MA	Memetik Algoritma
OÇS	Ortalama Çözüm Süresi
RUAGS	Rassallaştırılmış Uyarlamalı Aç Gözlü Sezgiseli
TYSP	Tesis Yer Seçimi Problemi
YAEA	Yerel Aramalı Evrimsel Algoritma
YBA	Yol Birleştirme Algoritması
YS_ARP	Yer Seçimi Ve Araç Rotalama Problemi
YSD	Yüzde Sapma Değeri
ZP_ARP	Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi
2HZP_ARP	İki Aşamalı Hat Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi

1. GİRİŞ

Günümüzün rekabetçi ortamında, tüketim bilincinin artması ve kaynakların azalması nedeniyle firmaların ayakta kalabilmeleri için kaynakları verimli bir şekilde kullanarak, mal ve hizmeti kaliteli ve ucuz bir şekilde üretmeleri gerekmektedir. Zira başarılı bir yönetim için sadece kaliteli hizmet veya ürün sunmak yeterli değildir. Ticaret hayatını incelendiğinde, kapanan firmaların pek çoğunda kaliteli hizmet veya ürünler sunulmakta olduğu, bu işletmelerin kapanma gerekçelerinin kötü bir finansal yönetim olduğu ortaya çıkacaktır. “Kar sağlayarak ayakta kalma” amacına ulaşmakta kullanılacak yollardan birisi, tedarikçiden müşteriye kadar uzanan dağıtım ağı boyunca hammadde, yarı ürün ve ürünün etkin bir şekilde depolanması ve taşınmasıdır. Dağıtım ağlarının tasarımında verilen kararlar genelde stratejik seviye kararlardır ve şu sorulara cevap aranmaktadır;

- Fabrika ve depolar nerelere yerleştirilecek ve bu tesislerden müşterilere ürünler nasıl gönderilecek?
- Ne, nerede, ne kadar üretilecek?
- Her aşamada ne kadar stok tutulacak?

Bu kararlardan en önemlisi ise tesislerin nerelere yerleştirileceğidir. Çünkü tesis kurma işlemleri yüksek maliyetlere sahiptir ve kurulan tesisler uzun yıllar boyunca değişmemektedir. Kısaca, müşteri ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tesislerin yerlerinin ve hangi müşterinin hangi tesisten hizmet göreceğinin belirlenmesi olarak tanımlanan Tesis Yer Seçimi Problemi (TYSP), teorik ve pratik öneminden dolayı uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir problem tipi olmuştur.

“Ürünlerin tesislerden müşterilere nasıl gönderileceği” sorusu ile ilgilenen dağıtım da genelde tek başına yüksek maliyetli bir işlemdir. Lojistik süreçteki toplam maliyetlerin %30-60’ ını dağıtım maliyetleri oluşturmaktadır. Bu nedenle önemli bir bileşen olup etkin olarak yönetilmesi gereklidir. Dağıtım yönetiminin amacı, istenen

müşteri hizmet düzeyine en düşük maliyetle ulaşacak bir dağıtım sistemini tasarlamak ve buna işlerlik kazandırmaktır. İyi bir dağıtım yönetimi işletmenin toplam dağıtım maliyetlerinde önemli ölçüde bir azalma sağlayabilmektedir. Bu nedenle taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi konusunda pek çok araştırmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların önemli bir kısmının Araç Rotalama Problemi (ARP) alanında olduğu gözlenmektedir.

Tesislerin yer seçimi kararı verilirken, müşterilere gerçekleştirilecek taşımacılık işlemlerinin de göz önüne alındığı problemler olarak tanımlanan Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (YS_ARP), telekomünikasyon ağlarının tasarımından kargo taşımacılığına, dayanıksız tüketim ürünlerinin dağıtımından askeri ekipman lojistiğine kadar birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. YS_ARP, isminden de anlaşılacağı gibi, “Tesis Yer Seçimi” ve “Araç Rotalama Problemi” adlı iki ayrı problemin eş zamanlı incelenmesi ile ortaya çıkan bir problem tipidir. Her iki problemin de kendi içerisinde değişik türleri mevcuttur. YS_ARP konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde genelde gerçek hayat problemlerinin çözümüne yönelik olduğu, yani akademik çalışmalar ile sınırlı kalmadığı görülmektedir. YS_ARP’de incelenen problem türleri, sınıflandırmalar ve çözüm yöntemleri hakkında detaylı bilgilerin bulunduğu literatür taraması çalışmalarında da bu çeşitlilikten bahsedilecektir.

Bu tezde ise Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (YS_ARP)’nin değişik bir tipi olan Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (HYP_YSARP) ele alınmıştır. Zaman Pencereci Araç Rotalama Probleminde (ZP_ARP) bir müşteriye belirli bir zaman aralığında uğranması esastır. Eğer araç müşteriye bu zaman aralığından önce gelirse, zaman aralığının alt sınırına kadar beklemektedir. Zaman aralığının üst sınırından sonra ise araç girişi kabul edilmemektedir. Pratikte, ZP_ARP kapsamına giren birçok durum söz konusudur. Örneğin, marketler gün içerisinde müşteriler alışveriş yaparken market içerisinde çalışanların dolaşmasını istememektedir. Dolayısıyla raf düzenlemeleri, market açılışından önce yapılmaktadır. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için de markete tedarikçiden ürün sevkiyatının sabah erken saatlerde (örneğin 7:00-9:00 arasında) gerçekleştirilmesi

istenmektedir. Bu örnekte, marketlere gerçekleştirilecek ürün sevkiyatı problemi ZP_arp olarak kabul edilebilir.

Fakat düğümlere ek olarak hatlar üzerinde zaman penceresinin mevcut olduğu durumlar da pratikte mevcuttur. Günümüzde terör nedeniyle alınan güvenlik tedbirlerden dolayı yolların kısıtlı kullanımı ya da köprülerin sadece belirli saatler dahilinde kamyon, tır vs. gibi taşıma araçları için geçiş izni vermesi gibi durumlar bu problemi klasik arp'den ayırmaktadır. Bu uygulamaya göre, bazı yollar günün sadece belirli zaman aralıklarında araç sevkiyatı için uygundur. Bu zaman aralıkları dışında bu yolların kullanılmasına izin verilmemektedir. Bu tür bir problem YS_arp'ye benzerlik gösterse de, YS_arp için geliştirilmiş çözüm yöntemleri bu problem için yetersiz kalmaktadır.

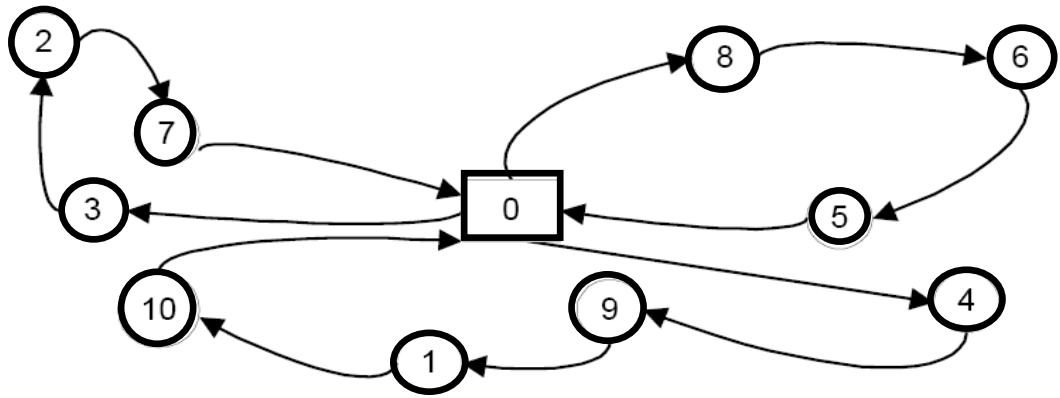
Bu nedenle, bu tez kapsamında Yer Seçimi ve Araç Rotalama Probleminin (YS_arp) değişik bir tipi olan Hat Zaman Pencereci Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (HYP_YSARP) ilk kez ele alınmış, problemin tanımı ve varsayımları ortaya konularak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, çeşitli eşitsizliklerin eklenmesi ve bazı kısıtların gevşetilmesi suretiyle kuvvetlendirilmiş, geliştirilen matematiksel modellerin performansı literatürde ZP_arp için geliştirilmiş olan ve düğüm sayılarının 25 ile 100 arasında değiştiği test problemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde literatürde daha önce çalışılmamış fakat gerçek hayatta karşılaşılan “Askeri lojistik üslerinin kurulması ve hizmet planlaması, yolların belirli saatler dahilinde kullanıldığı bölgelere tesis kurma ve dağıtım ağlarını planlama” gibi özel durumlar için optimal çözüme çok kısa süre içerisinde çok yakın sonuçlar üreten bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Tezin diğ er bölümleri řu şekilde organize edilmiştir.

İkinci bölümde, YS_ARP' nin tanımı yapılmış ve değişik tipleri ele alınmıştır. Ü   nc  bölümde ise HZP_YSARP' nin tanımı yapılmış, literatürde HZP_YSARP ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanamadığı için YS_ARP için yapılan çalışmalar incelenmiş ve HZP_YSARP için geliştirilen matematiksel modeller sunulmuştur. Geliştirilen matematiksel modellerin performansını test etmek amacıyla yapılacak deneysel çalışmalar ise beşinci bölümde ele alınmıştır. Son olarak, genel bir değerlendirme yapılarak bu konuda ileride yapılabilecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ

Araç Rotalama Problemi (ARP), müşteri ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla bir araç filosu için en küçük maliyetli rotaların belirlenmesi problemidir. Kuzey Amerika ve Avrupa’da gerçekleştirilen pratik uygulamalarda, bilimsel yöntemler kullanılarak planlanan dağıtım işlemleri ile toplam ulaştırma maliyetlerinde %5 ile %20 arasında bir iyileşme gerçekleşmiştir. Bu tür iyileştirmeler global ekonomi üzerinde gözle görülür bir etkiye neden olmaktadır. Aşağıdaki şekilde örnek bir ARP çözümü sunulmaktadır.



Şekil 2.1. Örnek bir ARP çözümü

Ekonomideki öneminden dolayı yaklaşık 50 yıldır üzerinde çalışmalar yapılan ARP, ilk kez 1959 yılında Dantzig ve Ramser [Dantzig ve Ramser, 1959] tarafından öne sürülmüştür. Bu çalışmanın devamında bu problem için çeşitli araştırmacılar tarafından değişik matematiksel modeller geliştirilmiş ve çözüm yöntemleri önerilmiştir [Toth ve Vigo, 2002].

Araç Rotalama Problemlerinin; Karma Kapasiteli ARP, Çoklu Depoya Sahip ARP, Bölünmüş Talebe Sahip ARP, Belirsiz Talebe Sahip ARP, Geri Toplaması Olan ARP, Zaman Pencereci ARP, Asimetrik ARP gibi birçok türü bulunmaktadır. Çalışmanın devamında, incelediğimiz probleme benzeyen ARP türleri incelenecektir.

2.1. Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi

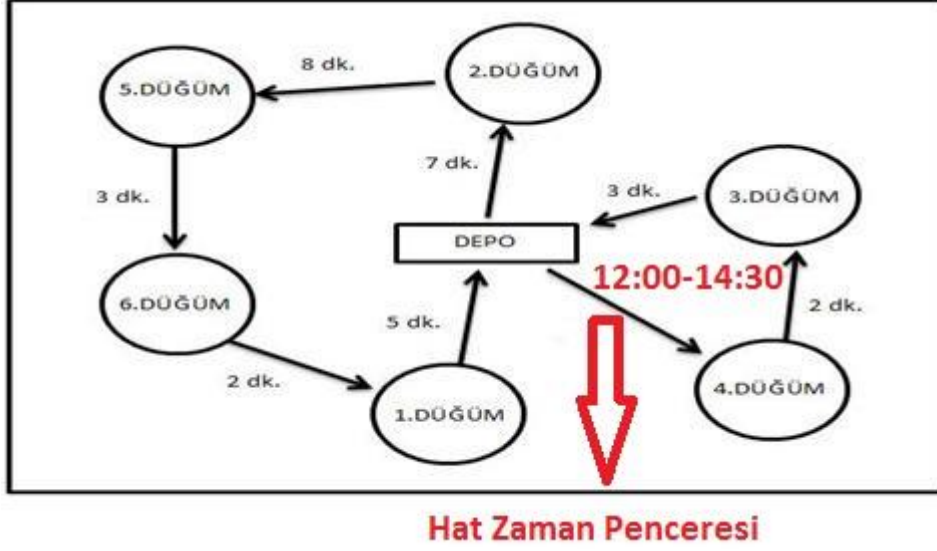
Tesislerin yer seçimi kararı verilirken müşterilere gerçekleştirilecek taşımacılık işlemlerinin de göz önüne alındığı problemler olarak tanımlanan Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (YS_arp), telekomünikasyon ağlarının tasarımından kargo taşımacılığına, dayanıksız tüketim ürünlerinin dağıtımından askeri ekipman lojistiğine kadar birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Kavramsal olarak 1960'lı yıllarda [Von Boventer, 1961; Maranzana, 1965; Webb, 1968; Lawrence ve Pengilly, 1969; Christofides ve Eilon, 1969] tartışılmaya başlanmasına rağmen, YS_arp'nin matematiksel olarak incelenmesi 1970'li yılların başlarına denk gelmektedir. Watson-Gandy ve Dohrn (1973) YS_arp üzerinde çalışan ilk araştırmacılardandır [Watson-Gandy ve Dohrn, 1973]. Problemin karmaşıklığından dolayı bu konuda yapılan çalışmaların çok küçük bir kısmında kesin algoritmalar, büyük bir kısmında ise sezgisel yöntemler üzerinde yoğunlaşmıştır.

2.2. Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi

arp'nin bir diğer tipi olan Zaman Pencereli Araç Rotalama Probleminde ise (ZP_arp) her müşteriye ait bir zaman aralığı (a_i, b_i) bulunmakta ve araç müşterilere bu zaman aralığında uğramak zorundadırlar. Zaman penceresinde a_i servise en erken başlama zamanını, b_i servise en geç başlama zamanını ifade etmektedir ve müşteriye en erken başlama zamanından önce gelen araç verilen zaman penceresine kadar beklerken, en geç başlama zamanından sonra araç girişine izin verilmemektedir. ZP_arp uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir problem türü olmuştur. Bu konuda Golden ve Assad [Golden, B.L. ve Assad, 1986, 1988], Desrochers ve ark. [Desrochers ve ark., 1988], Solomon ve Desrosiers [Solomon ve Desrosiers, 1988], Cordeau ve ark. [Cordeau ve ark., 2001], Bräysy ve Gendreau [Bräysy ve Gendreau, 2005a, 2005b] tarafından yapılmış kapsamlı literatür araştırması makaleleri bulunmaktadır.

2.3. Hat Zaman Pencere Arac Rotalama Problemi

Hat Zaman Pencere Arac Rotalama Problemi (HZA_RAP) temelde ZA_RAP ile benzerlik göstermektedir. Ancak günümüzde terör nedeniyle alınan güvenlik tedbirlerden dolayı yolların kısıtlı kullanımı ya da köprülerin sadece belirli saatler dahilinde kamyon, tır vs. gibi taşıma araçları için geçiş izni vermesi gibi durumlar bu problemi klasik RAP'den ayırmaktadır. Aşağıdaki şekilde örnek bir HZA_RAP şebekesi sunulmaktadır.



Şekil 2.1. Örnek bir HZA_RAP şebekesi

Yapılan literatür taraması sonucunda RAP'de zaman penceresinin düğümler yerine hatlar üzerinde tanımlandığı yer seçimi problemi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez kapsamında RAP'nin değişik bir tipi olan HZA_YRAP üzerinde yoğunlaşmıştır.

3. HAT ZAMAN PENCERELİ YER SEÇİMİ VE ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Hat Zaman Pencereli Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (HZIP_YSARP) ilk defa bu tezde inceleneceği için bu bölümde öncelikle problemin tanımı yapılarak literatürde bu probleme benzerlik gösteren YS_ARP için yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

3.1. Problem Tanımı

HZIP_YSARP en genel hali ile şu şekilde tanımlanabilir. $G(N,A)$ tam bağlı (bütün düğümler arasında doğrudan bir ayrıtın mevcut olduğu durum) bir serim olsun. $N = N_0 \cup N_C$ düğüm kümesi ve A ise bu düğümler arasında tanımlanan ayrıt kümesidir $(A = \{(i, j) | i \neq j \text{ ve } i, j \in N\})$ Düğüm kümesinde N_0 potansiyel depo kurulum noktalarını, N_C ise müşterileri temsil etmektedir. Bu serimde c_{ij} , (i,j) ayrıtının (hat, yol) uzunluğunu (maliyetini) temsil etmektedir ve üçgensel eşitsizlik $(c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj})$ sağlanmaktadır. Ayrıca, her ayrıt için ayrıtın kullanılabileceği en erken zaman (a_{ij}) ve en geç zaman (b_{ij}) söz konusudur ve bir araç bu ayrıtta en erken zamandan önce geldiği zaman en erken zamana kadar beklemek ve bu zamandan itibaren yolculuğuna devam etmek zorundadır. En geç zamandan sonra ise ayrıtın kullanılmasına izin verilmemektedir. Her potansiyel depo için bir kapasite (CDk) ve sabit kurulum maliyeti (FDk) söz konusudur. Her müşterinin pozitif bir talebi (di) vardır. Ele alınan problem, tanımlanan bu sistemde aşağıdaki kısıtlar altında;

- a) Depoların nerelere kurulacağını,
- b) Müşterilerin kurulan depolardan hangisine atanacağını ve
- c) Kurulan depolara atanan müşterilere nasıl bir rota üzerinde hizmet verileceğinin en küçük maliyet ile belirlenmesi problemidir. Kısıtlar:

1. Bir hat kullanılacaksa, o hattın uygun olduğu zaman aralıklarında kullanılmalı,
2. Her müşteriye kesinlikle bir kez uğranmalı,
3. Bir araç sadece bir kez kullanılmalı,
4. Bir rota bir depodan başlamalı ve tekrar aynı depoda son bulmalı,
5. Rota üzerindeki herhangi bir hat üzerinde taşınan yük miktarı araç kapasitesini geçmemeli,
6. Depoya atanan müşterilerin talepleri toplamı depo kapasitesini geçmemeli.

HZP_YSARP, her ikisi de kendi içinde NP-zor problemler sınıfına giren Tesis Yer Seçimi Problemi (TYSP) ve Hat Zaman Pencereli Araç Rotalama Probleminin (HZP_ARP) eş zamanlı dikkate alındığı problem tipidir. Müşterilere gerçekleştirilecek taşımacılığın doğrudan yapıldığı durumda problem klasik TYSP'ye, tek bir deponun kurulduğu durumda problem HZP_ARP'ye, kurulacak tesisler belli olduğu durumda problem çok depolu HZP_ARP'ye dönüşmektedir ki bu problemlerin her biri NP-zor problemler sınıfına giren problemlerdir. Dolayısıyla HZP_YSARP' de NP-zor problemler sınıfındadır. Yapılan literatür taraması sonucunda, HZP_YSARP ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, tezin bu bölümünde, HZP_YSARP' ne benzerlik gösteren problemler ile ilgili yapılmış çalışmalara değinilecektir.

3.2. Hat Zaman Pencereli Tesis Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi ile İlgili Kaynak Araştırması

Yapılan literatür taraması sonucunda, HZP_YSARP ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır, bu nedenle HZP_YSARP' ne benzerlik gösteren problemler ile ilgili yapılmış çalışmalara değinilecektir. İncelediğimiz problem; “Deterministik, tek aşamalı, çok tesisli, çok araçlı, depo ve araç kapasiteli YS_ARP” ile benzerlikler göstermektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, problemin karmaşıklığından dolayı çözüm yöntemlerinin bir kısmında kesin çözüm yöntemleri, büyük bir kısmında ise sezgisel/meta-sezgisel yöntemler üzerinde yoğunlaşıldığı görülmüştür.

Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (YS_ARP) için, depolarda da kapasite kısıtının dikkate alındığı bir çalışmada Prins ve ark. (2006a) tarafından problem için matematiksel model önerilmiştir [Prins ve ark., 2006a]. Problemin çözümü için, içerisine rassallığın da ilave edildiği kazanç algoritması ile aç gözlü sezgiselinin eş zamanlı kullanılmasından oluşan melez bir yöntem olan Rassallaştırılmış Uyarlamalı Aç Gözlü Sezgiseli (RUAGS, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)) önerilmiştir. Bu yöntemde çözümü daha da iyileştirmek için algoritmanın sonlanması ile elde edilen çözüme Yol Birleştirme Algoritması (YBA, Path Relinking) uygulanmıştır. Literatürdeki mevcut problemler çözülmüş ve büyük bir kısmında o ana kadar bulunan çözümlerden daha iyi çözümler elde edildiği gösterilmiştir. Ayrıca çözüm sonrası YBA'nın etkisinin olup olmadığı da incelenmiş olup, bu algoritmanın çözümlerde %1.25 oranında iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Aynı problem için geliştirilen diğer bir çalışmada ise [Prins ve ark., 2006b] genetik algoritma ile yerel arama yöntemlerinin melezlendiği Memetik Algoritma (MA, Memetic Algorithm) geliştirilmiştir. Algoritmada, aday çözümlerin topluluğundan oluşan yığının çözüm uzayının değişik bölgelerinde aramayı gerçekleştirmek amacıyla, yığının bireyleri arasında benzerliklerin ölçüldüğü bir uzaklık fonksiyonu tanımlanmış ve bu fonksiyonun belli bir seviyenin altında olduğu bireyler yığına alınmamıştır. Algoritmanın test problemleri üzerinde etkinliği incenmiş ve birçok test probleminde diğer yöntemlere nazaran daha iyi çözümlere ulaşıldığı gösterilmiştir.

Belenguer ve ark. (2006) tarafından tek aşamalı, çok tesisli, çok araçlı, hem tesis hem de araçların kapasite kısıtlarının olduğu YS_ARP için üstel sayıda kısıta sahip iki yeni matematiksel model önerilmiş ve çeşitli geçerli eşitsizlikler geliştirilerek en iyi çözümlere ulaşılmıştır [Belenguer ve ark., 2006]. Bu çalışmada, en fazla 32 müşteriye sahip küçük boyutlu test problemlerinde bir dakika içerisinde en iyi çözümlere ulaşılırken, müşteri sayısının 134'e kadar çıktığı büyük boyutlu test problemlerinde ise oldukça iyi alt sınır değerlerine ulaşıldığı raporlanmıştır.

Barreto (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise kümeleme tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir [Barreto, 2007]. Bu yöntemde bir ilk önce müşteriler değişik benzerlik kriterlerine göre gruplanmış, daha sonra her bir grup kendi içerisinde rotalanmıştır ve elde edilen rotalar yerel arama yöntemleri kullanılarak iyileştirilmiştir. Son adımda ise her bir rota tek bir müşteri olarak kabul edilip depolara kapasite kısıtları dikkate alınarak atanmıştır. Geliştirilen bu sezgisel yöntemin performansı, literatürde bulunan YS_ARP test problemleri ve ARP test problemlerinin YS_ARP'a uyarlanması ile elde edilen test problemleri üzerinde incelenmiştir. Sonuç olarak, değişik benzerlik kriterlerinin değişik problemlerde iyi çözümler elde ettiği tespit edilmiştir.

Marinakis ve Marinaki (2008) tarafından yapılan bir çalışmada ise Kuş Sürüşü Eniyilemesi (KSE), RUAGS, Genişletilmiş Komşu Arama (GKA, Expanding Neighbourhood Search) ve YBA'nın melezlenmesi ile elde edilen sezgisel bir yöntem önerilmiştir [Marinakis ve Marinaki, 2008]. Bu yöntemde RUAGS ile elde edilen çözümler GKA ile iyileştirilerek başlangıç çözümü olarak KSE'ye verilmekte, GKA ve YBA kullanılarak KSE'nin performansı arttırılmaktadır. Bu çalışma ile oldukça benzerlik gösteren bir diğer çalışmada ise [Marinakis ve ark., 2008] Bal Arısı Eniyilemesi (BAE), RUAGS, GKA ve YBA'nın melezlenmesi ile elde edilen sezgisel bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde RUAGS ile elde edilen çözümler GKA ile iyileştirilerek başlangıç çözümü olarak BAE'ye verilmekte, GKA ve YBA kullanılarak BAE'nin performansı arttırılmaktadır. Algoritmaların performansı literatürdeki test problemleri üzerinde incenmiş ve bazı test problemlerinde diğer yöntemlere nazaran daha iyi çözümlere ulaşıldığı gösterilmiştir. Ancak YS_ARP için iyi çözümler üreten yöntemler ile [Prins ve ark., 2006a; Prins ve ark., 2006b) herhangi bir karşılaştırma yapılmamıştır.

Duhamel ve ark. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada ise RUAGS ile Yerel Aramalı Evrimsel Algoritmanın (YAEA, Evolutionary Local Search) melezlenmesinden oluşan bir yöntem önerilmiştir [Duhamel ve ark., 2009]. Bu yöntemde, RUAGS ile elde edilen çözümler YAEA için başlangıç çözümü olarak kabul edilmiş ve değişik yerel arama yöntemleri kullanılarak iyi çözümler elde

edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, YS_ARP çözümleri GSP için sıklıkla kullanılan ve içerisinde müşterilerin rotalardaki göreceli sıralarının tutulduğu permütasyon kodlama kullanılmıştır. Bu kodlama kullanılarak problem kaynak kısıtlı en kısa yol problemine dönüştürülmüş ve bu problemin çözümünden uygun bir YS_ARP çözümü elde edilmiştir. Algoritmanın etkinliği literatürdeki test problemleri üzerinde yine literatürde önerilmiş diğer sezgisel yöntemler ile [Prins ve ark. 2006a, Prins ve ark. 2006b] karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, çözüm süreleri açısından daha kötü bir performans göstermesine rağmen birçok test probleminde diğer yöntemlere nazaran daha iyi çözümler elde edilmiştir.

Deterministik, tek aşamalı, çok tesisli, çok araçlı, depo ve araç kapasite kısıtlı YS_ARP'ye benzerlik gösteren problemlerin de ele alındığı çeşitli çalışmalar da literatürde mevcuttur. Labbe (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, YS_ARP'ye oldukça benzerlik gösteren bir diğer problem olan Çevrimli Tesis Yer Seçimi Problemi (Plant Cycle Location Problem) ele alınmıştır [Labbe, 2004]. Bu problem telekomünikasyon ağlarının tasarımında sıklıkla karşılaşılan bir problem tipi olup tesislere atanan müşteri sayısı tesisin kapasitesinden küçük olmakta ve atanan müşterilerin hepsine atandıkları depodan çıkan bir tek rota ile hizmet verilmektedir. Bu problem için bir matematiksel model ve çeşitli geçerli eşitsizlikler geliştirilerek en iyi çözümlere ulaşılmıştır. Bu çalışmada 100 müşteri 10 potansiyel depoya kadar rassal test problemleri ve 120 müşteri 16 potansiyel depoya sahip bir gerçek hayat problemi için makul sürelerde en iyi çözümlere ulaşılmıştır.

Ölçek ekonomisinin dikkate alındığı bir başka çalışmada ise, tek aşamalı, çok tesisli, araç ve depo kapasite kısıtlı, depolama maliyetlerinin parçalı doğrusal bir yapıda olduğu durumun göz önüne alındığı YS_ARP incelenmiştir [Melechovsky ve Prins, 2005]. Bu problem için tabu arama ve değişken komşu arama sezgisellerinin melezlenmesinden oluşan sezgisel bir yöntem önerilmiş ve bu iki sezgiselin ayrı ayrı kullanılması ile elde edilen çözümler kullanılarak önerilen sezgiselin performansı test edilmiştir. Sonuç olarak melez sezgiselin diğer iki yönteme nazaran iyi çözümler verdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, ölçek ekonomisini dikkate almanın çözüme etkileri araştırılmıştır. Buna göre müşteri taleplerinin, kendisine daha yakında başka

açık depolar olmasına rağmen, toplam depolama miktarının yüksek (dolayısıyla ölçek ekonomisinin etkisiyle maliyetlerinin düşük) olması nedeniyle daha uzaktaki depolara atandığı gözlemlenmiştir.

Berger (2007) tarafından depo kapasite kısıtsız ve rota uzunluğunun belli bir değerden fazla olamayacağı YS_ARP incelenmiştir [Berger, 2007]. Rota uzunluğu kısıtı pratikte, hızlı kargo gönderimi, bozulabilir ürün lojistiği gibi zaman sınırının bulunduğu dağıtım sistemlerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu problem için üstel sayıda karar değişkenine sahip küme ayrıştırma (set partitioning) tipi matematiksel model ve yeni geçerli eşitsizlikler önerilmiştir. Buna ek olarak, problemin çözümü için Dal-Fiyat (DF, Branch and Price) algoritması geliştirilmiştir. Bu çalışmada, geliştirilen yeni geçerli eşitsizliklerin alt sınırı büyük miktarlarda iyileştirdiği tespit edilmiş, 100 müşteri ve 10 potansiyel depoya sahip test problemlerinde makul sürelerde en iyi çözümlere ulaşılmıştır.

Klasik araç rotalama ve YS_ARP'nin temel varsayımlarından birisi de araçların tek bir rotada sadece bir kere kullanılmasıdır. Lin ve Kwok tarafından yapılan bir çalışmada (2005) bu varsayım ortadan kaldırılmış, bir aracın birden fazla rotada kullanılabileceği durum incelenmiştir. Buna ek olarak, birden fazla amaç (toplam maliyet, çalışma saati dengesi ve yük dengesi) dikkate alınmıştır. Bu problemin çözümü için tavlama benzetimi ve tabu arama algoritmaları geliştirilmiştir. Rassal olarak üretilmiş 18 adet problem üzerinde algoritmaların etkinliği incelenerek tavlama benzetimi algoritmasının daha iyi çözümler ürettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen algoritma bir gerçek hayat problemine de uygulanmıştır.

3.3. Hat Zaman Pencereli Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi İçin Önerilen Matematiksel Model

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha önce bu konunun hiçbir araştırmacı tarafından ele alınmadığı görülmektedir. Bu nedenle, ilk olarak problemin çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. HZP_YSARP için

önerilen matematiksel modellerde kullanılan dizin kümeleri ve parametreler ise şu şekildedir.

Dizin Kümeleri ve Parametreler:

N_0 : potansiyel depo kurulum noktaları

N_c : müşteri kümesi

N : tüm düğümler kümesi ($N = I \cup J \cup K$)

c_{ij} : i, j ayrıtının (hat, yol) uzunluğu ($\forall i, j \in N$)

t_{ij} : i düğümünden j düğüme ulaşım süresi ($\forall i, j \in N$)

d_i : i müşterisinin talebi ($\forall k \in K$)

a_{ij} : (i, j) hattının kullanılabileceği en erken zaman

b_{ij} : (i, j) hattının kullanılabileceği en geç zaman

M : büyük bir sayı

C_v : araç kapasitesi

FD_k : sabit kurulum maliyeti

CD_k : depo kapasitesi

HZP_YSARP için geliştirilen matematiksel modelde kullanılan karar değişkenleri ise şu şekildedir.

İkili Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & (i, j) \text{ ayrıtı herhangi bir rota üzerinde ise } (\forall i, j \in N) \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 & k \text{ potansiyel deposu açılırsa } (\forall k \in N_0) \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & i \text{ müşterisi } k \text{ deposuna atanırsa } (\forall i \in N_C, \forall k \in N_0) \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

Ek Karar Değişkenleri

U_i ; i düğümüne girmeden hemen önce araçtaki dağıtılacak ürün miktarı ($\forall i \in N_C$)

S_i ; aracın i düğümünden çıkış zamanı ($\forall i \in N_C$)

Model

$$\text{Enküçük} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} + \sum_{k \in N_0} FD_k y_k \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji} = \sum_{j \in N} x_{ij} \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in N_0} z_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_C \quad (4)$$

$$x_{ik} \leq z_{ik} \quad \forall i \in N_C, \forall k \in N_0 \quad (5)$$

$$x_{ki} \leq z_{ik} \quad \forall i \in N_C, \forall k \in N_0 \quad (6)$$

$$x_{ij} + z_{ik} + \sum_{m \in N_0, m \neq k} z_{jm} \leq 2 \quad \forall i, j \in N_C, i \neq j, \forall k \in N_0 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_C} d_i z_{ik} \leq CD_k y_k \quad \forall k \in N_0 \quad (8)$$

$$U_j - U_i + CV x_{ij} + (CV - d_i - d_j) x_{ji} \leq CV - d_i \quad \forall i, j \in N_C \quad (9)$$

$$U_i \geq d_i + \sum_{j \in N_C, j \neq i} d_j x_{ij} \quad \forall i \in N_C \quad (10)$$

$$U_i \leq CV - (CV - d_i) \left(\sum_{k \in N_0} x_{ik} \right) \quad \forall i \in N_C \quad (11)$$

$$S_i - S_j + Mx_{ij} \leq M - t_{ij} \quad \forall i, j \in N_C \quad (12)$$

$$S_i \geq a_{ij}x_{ij} \quad \forall i \in N_C; \forall j \in N \quad (13)$$

$$S_i \leq b_{ij} + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N_C; \forall j \in N \quad (14)$$

$$S_j \geq (a_{ij} + t_{ij})x_{ij} \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N_C \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (16)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_C, \forall k \in N_0 \quad (17)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in N_0 \quad (18)$$

$$y_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; \forall k, l \in (j \cup K_j)$$

Bu modelde amaç fonksiyonu (1) toplam depo kurulum ve taşıma maliyetini en küçükleme. (2) numaralı kısıt her müşteriye bir kez uğramayı garantilerken, (3) numaralı kısıt bütün düğümlere giren ve çıkan hat sayısını birbirine eşitlemektedir. (4) numaralı kısıt her müşterinin mutlaka bir depoya atanmasını garantilemektedir. (5)–(7) numaralı kısıtlar ise bir rotanın başladığı depoda sonlanmasını garantilemektedir. (5) numaralı kısıt rota üzerindeki son müşterinin gireceği depoya, (6) numaralı kısıt rota üzerindeki ilk müşterinin çıktığı depoya atanmasını sağlarken, (7) numaralı kısıt rota üzerinde birbirine bağlı iki müşterinin farklı depolara atanmasını engellemektedir. (8) numaralı kısıt depolara atanan müşterilerin toplam taleplerinin depo kapasitesinden küçük olmasını sağlamaktadır. (9) numaralı kısıt alt tur oluşumlarını engellemekte, araç üzerinde taşınan yükün araç kapasitesinden küçük olmasını sağlamak ve U_i karar değişkenlerine anlam kazandırmaktadır. (10)–(11) numaralı kısıtlar ise U_i karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını belirleyen kısıtlardır. (12) numaralı kısıt aracın müşterilerden çıkış zamanlarının rota üzerinde bir önceki müşteriye bağlı olarak belirlenmesini sağlamaktadır. (13) ve (14) numaralı kısıtlar ise her bir müşteriden çıkan aracın çıkış zamanının, kullanacağı hattın mümkün olan en erken ve en geç zaman aralıkları arasında olmasını garantilemektedir. Depo ile müşteriler arasında rotalama işlemleri için gerekli son kısıt olan (15) numaralı kısıt ise rota üzerinde uğranan ilk müşteriden çıkış zamanını

belirlemektedir. (16)–(18) numaralı kısıtlar işaret kısıtları olup x_{ij} , z_{ik} ve y_k karar değişkenlerinin ‘0’ ya da ‘1’ değerini almasını sağlamaktadır.

4. GEÇERLİ EŞİTSİZLİKLER

Bu bölümde, bir önceki bölümde tanıtılan matematiksel modellere eklenebilecek geçerli eşitsizlikler tanımlanacaktır. Bu eşitsizlikler, çözüm süresini kısaltmak için, matematiksel modellerdeki işaret kısıtların (16–18 numaralı kısıtlar) gevşetilmesi ile elde edilen doğrusal modelin çözümü ile elde edilen çözümü (alt sınır) en iyi çözüme yaklaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Normal şartlar altında mevcut matematiksel modelin en iyi çözüme ulaşmasında herhangi bir etkisi olmayan bu kısıtlar, doğrusal gevşetme ile anlamlı hale gelmektedir. Geçerli eşitsizlikler, geliştirilen kesin algoritmalarda bazı kesirli ve en iyi olmayan çözümlerin çözüm uzayından atılmasında oldukça etkin matematiksel ifadelerdir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi TYSP ve HZP_ARNP, HZP_YSARP'nin iki alt problemidir. Dolayısıyla bu problemler için geliştirilen geçerli eşitsizlikler HZP_YSARP için küçük değişiklikler ile kullanılabilir. Bu bölümde, model için de geçerli olan polinom büyüklükte dört geçerli eşitsizlik sunulacaktır. İlk geçerli eşitsizlik aşağıdaki gibidir.

$$z_{ik} \leq y_k \quad \forall i \in N_C, \forall k \in N_0 \quad (19)$$

Bu eşitsizlik açılmamış herhangi bir depoya müşteri atanamayacağını ifade etmektedir. Labbe ve ark.(2004) tarafından Çevrimli Tesis Yer Seçimi Problemi için geliştirilen bu geçerli eşitsizlik, ilgilenilen problem için halen geçerliliğini korumaktadır. Bir diğer geçerli eşitsizlik ise aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{i \in N_C} x_{ki} \geq y_k \quad \forall k \in N_0 \quad (20)$$

Bu eşitsizlik açılmış bir depodan en az bir tane araç çıkışı olmasını garantilemektedir. Depolardan çıkan araç sayısını alttan sınırlandıran bir diğer geçerli eşitsizlik ise şu şekildedir.

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{i \in N_C} x_{ki} \geq r(N_C) \quad (21)$$

Burada $r(N_C) = \left\lceil \sum_{i \in N_C} d_i / CV \right\rceil$ ve $\lceil \bullet \rceil$, $\bullet$ sayısından büyük en küçük tamsayıdır.

Benzer geçerli eşitsizlikler, ARP için Achuthan ve ark. (2003) tarafından da kullanılmıştır [Achuthan ve ark., 2003].

Son olarak, açılacak depo sayısını alttan sınırlandıran bir diğer geçerli eşitsizlik ise aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{k \in N_0} y_k \geq y_{enküçük} \quad (22)$$

Burada,

$$y_{enküçük} = \underset{S \subseteq N_0}{enküçük} \left\{ |S| \mid \sum_{k \in S} CD_k \geq \sum_{i \in N_C} d_i \right\} \quad (23)$$

Uygun bir HZP_YSARP çözümünde kurulacak depoların kapasiteleri toplamı, müşteri taleplerini karşılayacak seviyede ($y_{enküçük}$) olmalıdır. Bunun için kapasitelerine göre azalan sırada sıralanmış depolardan, $\sum_{k \in S} CD_k \geq \sum_{i \in N_C} d_i$ şartını sağlayan ilk S tanesi $y_{enküçük}$ olarak kabul edilebilir. Uygun bir çözümde kurulacak depo sayısı bu sayıdan daha küçük olamaz.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tezin bu bölümünde, HZP_YSARP için geliştirilen matematiksel modelin performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonuçları sunulacaktır. İlk olarak, performans kriteri olarak kullanılan gevşetme tiplerinden bahsedilecektir. Daha sonra deneysel çalışmalarda kullanılan test problemlerinin nasıl üretildiği ve son olarak da deneysel çalışmaların sonuçlarından bahsedilecektir.

5.1. Matematiksel model gevşetmeleri

HZP_YSARP için geliştirilen matematiksel modellerin performansını test etmek amacıyla kullanılan gevşetme tipleri şu şekildedir.

1. *Doğrusal Gevşetme*: Modelin doğrusal gevşetilmesi (DG_1) matematiksel modellerdeki (16)-(18) numaralı işaret kısıtlarının gevşetilmesi ile elde edilmektedir.
2. *Kuvvetlendirilmiş Doğrusal Gevşetme*: Daha iyi alt sınırlar elde etmek amacıyla, önerilen modele (19)-(22) numaralı geçerli eşitsizlik eklemeleri ile matematiksel model kuvvetlendirilebilir. Kuvvetlendirilmiş doğrusal gevşetmeler (DG_2) ise kuvvetlendirilmiş modeldeki (19)-(22) numaralı kısıtların gevşetilmesi ile elde edilmektedir.
3. *Kısmi Doğrusal Gevşetme*: Geliştirilen matematiksel modellerden elde edilen gevşetme sonuçları, bütün 0-1 karar değişkenleri yerine bir kısmının gevşetilmesi ile en iyi çözümlere daha da yaklaştırılabilir. Yapılan ön denemeler sonucunda, depoların kurulumu ile ilgili 0-1 karar değişkenlerinin tamsayı olarak kabul edilip diğer 0-1 karar değişkenlerinin gevşetilmesi ile kısa sürelerde oldukça iyi alt sınırlar elde edildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, kuvvetlendirilmiş modeldeki (16)-(17) numaralı işaret kısıtları gevşetilerek kısmi doğrusal gevşetme (KDG) değerleri elde edilmiştir.

Genellikle, kuvvetlendirilmiş matematiksel modellerde en iyi çözümlere diğerlerine nazaran daha kısa sürede ulaşılmaktadır. Bu nedenle, karşılaştırmalarda kullanmak üzere üst sınırların elde edilmesi amacıyla kuvvetlendirilmiş matematiksel model ve bu modelin tamsayılı çözümleri kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan test problemleri, literatürde ZP_ARP için Solomon (1987) [Solomon, 1987] tarafından üretilen test problemi kümelerinin 2HZP_ARP'a uyarlanmasıyla elde edilmiştir. Bu test problemi kümesi, müşteri sayısının 100 olduğu, düğümlerin 100x100'lük grid yüzey üzerinde yerleştirildiği 56 adet test probleminden oluşmaktadır. Bu test problemlerinde düğümler ile ilgili düğüm numarası, X ve Y koordinatları, talebi, düğümün en erken ve en geç hazır olma zamanları ve düğümlerde harcanan süreler bulunmaktadır. Bu problemler R1, C1, RC1, R2, C2, RC2 olarak adlandırılmaktadır ki, R tipi problemlerde müşteriler grid yüzey üzerinde rassal, C tipi problemlerde belli bölgelerde kümelenmiş şekilde, RC tipi problemlerde ise bir kısmı rassal bir kısmı ise kümelenmiş şekilde bulunmaktadır. R1, C1 ve RC1 tipi problemlerde zaman pencereleri dar ve araç kapasiteleri 200 birim; R2, C2 ve RC2 tipi problemlerde ise zaman aralıkları geniş ve araç kapasiteleri sırasıyla 1000, 700 ve 1000 birim olarak alınmıştır. Bu nedenle bir rota üzerinde R1, C1 ve RC1 tipi problemlerde R2, C2 ve RC2 tipi problemlere nazaran daha az müşteri bulunmaktadır.

Test problemlerinin üretilmesi esnasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- HZP_YSARP NP-zor sınıfında problemlerden olduğu için büyük boyutlu problemlerde en iyi çözümlerin elde edilmesi çok zordur. Bu nedenle, geliştirilen matematiksel modelin etkinliğinin belirlenmesi amacıyla küçük boyutlu problemler üretilmiştir. Bu nedenle 100 müşterilik test problemlerinin ilk 25 düğümü dikkate alınarak yeni test problemleri üretilmiştir. Dolayısıyla deneyisel karşılaştırmalar amacıyla her biri 25 müşteriye sahip olmak üzere 56 test problemi kullanılmıştır.

- Test problemlerinde bir adet depo ve 25 adet müşteri bulunmaktadır. HZP_YSARP'de ise birden fazla depo içerisinde bir ya da daha fazla depo alternatifi bulunmaktadır. Bu nedenle test problemlerinde bulunan depoya ek olarak her bir test problemi için 4'er adet depo daha 100x100'lük grid yüzey üzerinde rassal olarak yerleştirilmiştir. Sonuç olarak test problemlerinde 25 müşteri ve 5 potansiyel depo bulunmaktadır.
- Döğümler arasındaki maliyet ve uzaklıklar Öklid uzaklıkların dört haneli reel sayıya dönüştürülmesi ile elde edilmiştir.
- Solomon'un (1987) [Solomon, 1987] test problemleri temelde ZP_ARP için oluşturulduğu için zaman pencereleri döğüm bazlıdır. Yani orijinal problemdeki zaman pencereleri her bir döğüm için tanımlanmış zaman penceresidir. Bu test problemlerinin HZP_YSARP'e uyarlanması amacıyla her bir hattın zaman penceresi alt sınırı, o hattı oluşturan döğümlerin zaman penceresi alt sınırlarının küçük olanı; zaman penceresi üst sınırı, o hattı oluşturan döğümlerin zaman penceresi üst sınırlarının büyük olanı olarak kabul edilmiştir.
- Depo kapasiteleri için üç farklı senaryo belirlenmiştir. Bunlardan ilki depo kapasitelerinin sonsuz olduğu (*INF*) senaryodur ki bu senaryo her bir depo kapasitesinin müşteri taleplerinin toplamına eşit olması ile sağlanmıştır. Bu problem tipinde tek bir depo kurulumu yeterli olabilmektedir. Diğer iki senaryoda ise toplam talebin iki katı (*HLF*) ve dört katı (*QRT*) depolar arasında rassal bir şekilde dağıtılmıştır. Bu iki senaryoda kurulacak depo sayısının beklenen değeri, sırasıyla iki ve dört olmaktadır.
- Depo sabit maliyetleri için de üç farklı senaryo belirlenmiştir. Birincisinde depo sabit maliyeti sıfır (*ZER*) alınmıştır ki bu senaryoda problem çözümünde sadece taşıma maliyetlerinin etkisi olmaktadır. Diğer iki senaryoda ise depo sabit maliyetleri her bir depo için müşterilere olan ortalama uzaklık (*AVG*) ve müşterilere olan toplam uzaklık (*SUM*) olarak belirlenmiştir. Bu iki senaryoda ise depo sabit maliyetinin düşük ve yüksek olduğu durumun optimal sonuca etkisi incelenmiştir.

5.2. Deneyisel karşılaştırmalar

Önerilen matematiksel model ve gevşetme tipleri GAMS ara yüzünde kodlanmış ve matematiksel model çözücü olarak CPLEX 12.4 kullanılmıştır. Bütün koşumlarda çözücünün varsayılan parametre seviyeleri kullanılmıştır. Her bir koşul Intel Xeon 3.16 Ghz hızında 1 GB ara belleğe sahip, “Windows 7 Ultimate” işletim sistemi ile çalışan bilgisayarlarda gerçekleştirilmiştir. Bütün koşullar 1 saat ($1*60*60=3600$ saniye) ile sınırlandırılmıştır.

Matematiksel modelleri analiz etmek amacıyla aşağıdaki performans kriterleri kullanılmıştır.

Modelin tamsayılı çözümü için

- *En İyi Çözüme Ulaşılan Problem Sayısı (EÇUPS):* Çözüm süresi sınırları içerisinde matematiksel model tarafından en iyi çözüme ulaşılan problem sayısı
- *Ortalama Çözüm Süresi (OÇS):* Matematiksel modelin ortalama koşul süresi
- *Yüzde Sapma Değeri (YSD):* Matematiksel modellerin CPLEX çözücü ile bir saat tamsayılı koşturması sonucunda elde edilen üst sınır ($Z^{ÜS}$) ile alt sınır (Z^{AS}) arasındaki sapma değeridir. Bu değer aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$YSD = 100 * \left(\frac{Z^{ÜS} - Z^{AS}}{Z^{ÜS}} \right) \quad (3.24)$$

Modelin gevşetilmiş çözümleri için

- *Ortalama Çözüm Süresi (OÇS):* Matematiksel modelin ortalama koşul süresi
- *Gevşetilmiş Yüzde Sapma Değeri (GYSD):* İlgilenilen gevşetme yöntemi ile elde edilen çözümün (Z^G) önerilen matematiksel modellerin tamsayılı

koşumu sonucunda elde edilen en iyi çözümden (Z^*) sapma değeridir. Bu değer aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$GYSD = 100 \left(\frac{Z^* - Z^G}{Z^*} \right) \quad (3.25)$$

Çizelge 5.1. Matematiksel modelin problem parametreleri üzerindeki etkisi

Zam an Penc eresi Tipi	Depo Kap.	Depo Sabit Mal.	C Tipi Problemler			R Tipi Problemler			RC Tipi Problemler		
			OÇS	YSD	EÇUPS	OÇS	YSD	EÇUPS	OÇS	YSD	EÇUPS
Dar		ZER	3600.0	2.51	0(9)	1497.1	2.57	11(12)	3600.0	17.03	0(8)
		AVG	3600.0	2.98	0(9)	3600.0	2.43	9(12)	3600.0	7.99	0(8)
		SUM	3600.0	23.58	0(9)	1090.0	1.27	10(12)	3600.0	27.31	0(8)
		Ortalama	3600.0	9.69	0(27)	2062.4	2.09	30(36)	3600.0	17.44	0(24)
	HLF	ZER	3600.0	26.11	0(9)	392.3	0.00	10(12)	3600.0	29.99	0(8)
		AVG	3600.0	8.41	0(9)	104.7	0.00	8(12)	3600.0	3.01	0(8)
		SUM	3600.0	19.96	0(9)	1486.5	1.31	0(12)	3600.0	6.22	0(8)
		Ortalama	3600.0	18.16	0(27)	661.1	0.44	18(36)	3600.0	13.07	0(24)
	INF	ZER	3600.0	10.42	0(9)	1165.8	0.80	9(12)	3600.0	23.51	0(8)
		AVG	3600.0	3.61	0(9)	1192.9	0.20	12(12)	3600.0	2.91	0(8)
		SUM	3600.0	22.68	0(9)	2501.0	0.25	12(12)	3600.0	25.26	0(8)
		Ortalama	3600.0	12.24	0(27)	1619.9	0.42	33(36)	3600.0	17.22	0(24)
Ortalama			3600.0	13.36	0(81)	1447.8	0.98	81(108)	3600.0	15.91	0(72)
Geniş	QRT	ZER	2361.6	3.52	3(8)	416.7	0.00	11(11)	3600.0	18.35	0(8)
		AVG	1429.9	0.02	3(8)	204.2	0.00	11(11)	3600.0	4.79	0(8)
		SUM	3600.0	7.84	4(8)	341.3	0.00	11(11)	3600.0	29.63	0(8)
		Ortalama	2463.8	3.80	10(24)	320.7	0.00	33(33)	3600.0	17.59	0(24)
	HLF	ZER	1655.0	1.39	0(8)	82.8	0.00	11(11)	3600.0	23.21	0(8)
		AVG	1376.9	0.49	3(8)	25.2	0.00	11(11)	3600.0	5.31	0(8)
		SUM	785.5	0.54	7(8)	197.0	0.00	11(11)	3600.0	23.87	0(8)
		Ortalama	1272.5	0.81	10(24)	101.7	0.00	33(33)	3600.0	17.46	0(24)
	INF	ZER	2296.2	2.52	7(8)	115.7	0.00	11(11)	3600.0	16.77	0(8)
		AVG	1993.7	1.21	5(8)	164.0	0.00	11(11)	3600.0	3.32	0(8)
		SUM	2671.3	3.76	6(8)	438.1	0.00	11(11)	3600.0	29.12	0(8)
		Ortalama	2320.4	2.50	18(24)	239.3	0.00	33(33)	3600.0	16.40	0(24)
Ortalama			2018.9	2.37	38(72)	220.5	0.00	99(99)	3600.0	17.15	0(72)
Genel Ortalama			2855.9	8.19	38(153)	860.9	0.51	180(207)	3600.0	16.53	0(144)

Çizelge 5.1’de sırasıyla C, R ve RC tipi dar ve geniş zaman pencereli test problemleri ile matematiksel model kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Bu tablodan görüleceği gibi dar zaman penceresine sahip olan problemlerden C ve RC tipi problemlerde ortalama 1 saatlik bir koşum neticesinde en iyi çözümlere ulaşamazken sadece R tipi problemlerin bir kısmında en iyi çözümlere ulaşılmıştır. (108 problemin 81inde) Geniş zaman penceresine sahip problemlerden ise C ve R tipi problemlerde en iyi çözümlere ulaşılmış fakat RC tipi problemlerde en iyi çözümlere ulaşılammıştır. Zaman pencereleri farkı göz önünde bulundurulmadan genel olarak incelendiğinde ise C ve R tipi problemlerin bir kısmında (C tipi için 38/153, R tipi için 180/207) en iyi çözümlere ulaşılmış fakat RC tipindeki toplam 144 problemin hiçbirinde en iyi çözüme ulaşılammıştır. Geniş zaman penceresine sahip olan problemler, dar zaman penceresine sahip olan problemlere göre daha fazla sayıda probleme en iyi çözümler üretmiştir. Depo kapasiteleri dikkate alındığında ise geniş zaman pencereli C tipi problemlerde ve dar zaman pencereli R tipi problemlerde depo kapasitesinin sınırsız “INF” olduğu durumların diğer kapasiteli durumlara göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kapasitelerin talebin iki katı “HLF” ve dört katı “QRT” olduğu durumlar arasında karşılaştırma yapılacak düzeyde bir fark tespit edilememiştir. Dar zaman pencereli R tipi problemler incelendiğinde ise depo sabit maliyetlerinin sıfır “ZER” olduğu durumların diğer durumlara göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Depo kapasitelerinin ve depo sabit maliyetlerinin oluşturduğu farklılıklar diğer problemlerde en iyi çözümlere ulaşılmadığından belirgin olarak izlenememektedir. Tabloda “0” yazan satırlar o problem tipi ile ilgili herhangi bir en iyi çözüme ulaşamadığını, yanlarında bulunan parantez içindeki sayılar ise o problem tipinden kaç adet olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.2: Doğrusal gevşetme (DG_1) ile elde edilen sonuçlar

Zaman Penceresi Tipi	Depo Kap.	Depo Sabit Mal.	C Tipi Problemler		R Tipi Problemler		RC Tipi Problemler	
			OÇS	GYSD	OÇS	GYSD	OÇS	GYSD
Dar	QRT	ZER	0.06	44.14	0.03	13.49	0.03	48.46
		AVG	0.03	39.64	0.03	18.17	0.02	54.46
		SUM	0.03	23.20	0.03	35.72	0.03	19.55
	Ortalama		0.04	35.66	0.03	22.46	0.03	40.82
	HLF	ZER	0.03	52.45	0.03	15.67	0.03	53.33
		AVG	0.03	39.81	0.03	15.71	0.02	50.44
		SUM	0.02	26.50	0.03	8.41	0.03	15.28
	Ortalama		0.03	39.58	0.03	13.26	0.03	39.68
	INF	ZER	0.03	40.46	0.03	12.18	0.02	48.46
		AVG	0.03	43.58	0.03	13.44	0.03	55.96
		SUM	0.03	13.19	0.03	5.18	0.02	15.14
	Ortalama		0.03	32.41	0.03	10.27	0.02	39.85
	Ortalama		0.03	35.89	0.03	15.33	0.02	40.12
Geniş	QRT	ZER	0.03	24.59	0.03	6.37	0.02	48.58
		AVG	0.03	25.84	0.02	13.94	0.03	47.31
		SUM	0.03	15.30	0.03	34.71	0.03	13.51
	Ortalama		0.03	21.91	0.03	18.34	0.03	36.47
	HLF	ZER	0.03	31.36	0.03	14.28	0.03	54.82
		AVG	0.03	26.66	0.02	12.68	0.03	48.64
		SUM	0.02	21.69	0.03	5.33	0.03	12.21
	Ortalama		0.03	26.57	0.03	10.77	0.03	38.56
	INF	ZER	0.03	21.06	0.02	5.90	0.03	47.20
		AVG	0.03	21.19	0.03	6.90	0.03	48.54
		SUM	0.02	6.65	0.03	2.53	0.03	11.59
	Ortalama		0.03	16.30	0.03	5.11	0.03	35.78
	Ortalama		0.03	21.59	0.03	11.41	0.03	36.93
	Genel Ortalama		0.03	29.16	0.03	13.45	0.03	38.53

Çizelge 5.2’de sırasıyla C, R ve RC tipi dar ve geniş zaman pencereyi test problemleri ile doğrusal gevşetme (DG_1) kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu tablodan görüleceği gibi dar zaman pencereyi problemlerde ortalama 0.03 saniye gibi çok kısa bir süre içerisinde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalar göstererek iyi sonuçlara ulaşmıştır, bu durum en iyi R tipi problemlerde gözlenmektedir. Geniş zaman penceresine sahip problemlerde ise genel olarak yine 0.03 saniye gibi çok kısa sürelerde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalarla iyi sonuçlara ulaşılmış fakat C ve R tipi problemlerde RC tipi problemlere göre daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. R tipi problemlerde geniş ve dar zaman pencerelerinin ikisinde de çok kısa sürede iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Geniş zaman penceresine sahip olan problemler, dar zaman penceresine sahip olan

problemlere göre en iyi çözümlere daha fazla yaklaşmıştır. Depo kapasiteleri dikkate alındığında ise kapasitenin sınırsız “INF” olduğu durumların diğer durumlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş, kapasitelerin “HLF” ve “QRT” olduğu durumlar ise en iyi çözüme yaklaşma anlamında belirgin farklar gösterememiştir. Tüm problem tipleri incelendiğinde ise depo sabit maliyetlerinin toplam uzaklık olarak alındığı “SUM” durumların diğer durumlara göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Doğrusal gevşetme yöntemi; matematiksel modelin 1 saat koşumu sonucunda ulaştığı çözümlere çok kısa sürelerde yakın sonuçlar vererek matematiksel modelden daha iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 5.3. Kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin doğrusal gevşetmesi (DG_2) ile elde edilen sonuçlar

Zaman Penceresi Tipi	Depo Kap.	Depo Sabit Mal.	C Tipi Problemler		R Tipi Problemler		RC Tipi Problemler	
			OÇS	GYSD	OÇS	GYSD	OÇS	GYSD
Dar	QRT	ZER	0.04	37.30	0.03	10.30	0.05	43.57
		AVG	0.03	19.45	0.03	6.97	0.04	35.39
		SUM	0.03	21.73	0.03	35.12	0.04	18.38
	Ortalama		0.04	26.16	0.03	17.46	0.04	32.45
	HLF	ZER	0.03	28.57	0.04	6.44	0.04	33.77
		AVG	0.03	22.74	0.03	9.78	0.04	28.22
		SUM	0.03	24.32	0.04	4.29	0.04	9.30
	Ortalama		0.03	25.21	0.04	6.84	0.04	23.76
	INF	ZER	0.04	34.07	0.03	8.95	0.05	44.16
		AVG	0.03	38.71	0.05	8.04	0.03	51.28
		SUM	0.03	11.90	0.04	2.50	0.05	9.43
	Ortalama		0.03	28.23	0.04	6.49	0.04	34.96
Ortalama			0.03	26.53	0.04	10.26	0.04	30.39
Geniş	QRT	ZER	0.04	23.55	0.03	5.64	0.04	47.43
		AVG	0.03	12.64	0.03	2.16	0.04	26.30
		SUM	0.03	14.82	0.03	34.58	0.03	12.81
	Ortalama		0.03	17.00	0.03	14.13	0.04	28.85
	HLF	ZER	0.04	17.38	0.05	4.91	0.04	35.89
		AVG	0.04	14.99	0.04	6.54	0.04	27.00
		SUM	0.03	17.12	0.04	1.08	0.03	6.14
	Ortalama		0.03	16.50	0.04	4.17	0.04	23.01
	INF	ZER	0.03	21.06	0.03	5.16	0.04	47.09
		AVG	0.03	21.19	0.03	3.73	0.03	46.19
		SUM	0.03	6.65	0.03	1.27	0.03	9.82
	Ortalama		0.03	16.30	0.03	3.39	0.03	34.37
Ortalama			0.03	16.60	0.03	7.23	0.04	28.74
Genel Ortalama			0.03	21.86	0.04	8.81	0.04	29.56

Çizelge 5.3’de sırasıyla C, R ve RC tipi dar ve geniş zaman pencereli test problemleri ile kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin doğrusal gevşetmesi (DG2) kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu tablodan görüleceği gibi dar zaman pencereli problemler ortalama 0.04 saniye gibi çok kısa bir süre içerisinde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalar göstererek iyi sonuçlara ulaşmıştır, bu durum en iyi R tipi problemlerde gözlenmektedir. Geniş zaman penceresine sahip problemlerde ise genel olarak 0.03 saniye gibi çok kısa sürelerde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalarla iyi sonuçlara ulaşılmış fakat R tipi problemlerde C ve RC tipi problemlere göre daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. R tipi problemler geniş ve dar zaman pencerelerinin ikisinde de çok kısa sürede iyi sonuçlara ulaşmıştır. Geniş zaman penceresine sahip olan problemler, dar zaman penceresine sahip olan problemlere göre en iyi çözümlere daha fazla yaklaşmıştır. Depo kapasiteleri dikkate alındığında ise kapasitenin toplam talebin iki katı olduğu “HLF” durumların diğer durumlara göre gene olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş, kapasitelerin toplam talebin 4 katı olduğu “QRT” durumların ise sınırsız kapasiteye nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tüm problem tipleri incelendiğinde ise depo sabit maliyetlerinin toplam uzaklık olarak alındığı “SUM” durumların diğer durumlara göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yöntem; matematiksel modelin 1 saat koşumu sonucunda ulaştığı çözümlere çok kısa sürelerde yakın sonuçlar vererek hem matematiksel modelden hem de doğrusal gevşetme yönteminden daha iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 5.4. Kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin kısmi doğrusal gevşetmesi (KDG) ile elde edilen sonuçlar

Zaman Penceresi Tipi	Depo Kap.	Depo Sabit Mal.	C Tipi Problemler		R Tipi Problemler		RC Tipi Problemler	
			OÇS	GYSD	OÇS	GYSD	OÇS	GYSD
Dar	QRT	ZER	0.35	30.06	0.14	10.26	0.42	36.88
		AVG	0.06	19.45	0.09	6.97	0.08	35.39
		SUM	0.22	6.12	0.57	1.55	0.41	6.27
	Ortalama		0.21	18.54	0.26	6.26	0.30	26.18
	HLF	ZER	0.08	28.57	0.10	6.44	0.09	33.77
		AVG	0.77	9.22	0.20	7.83	0.93	20.78
		SUM	0.08	24.32	0.22	4.09	0.15	9.26
	Ortalama		0.31	20.71	0.17	6.12	0.39	21.27
	INF	ZER	0.07	34.07	0.12	8.90	0.07	44.16
		AVG	0.06	38.71	0.16	7.55	0.07	51.28
		SUM	0.08	11.90	0.09	2.50	0.08	9.43
	Ortalama		0.07	28.23	0.13	6.32	0.07	34.96
Ortalama			0.20	22.49	0.19	6.23	0.25	27.47
Geniş	QRT	ZER	0.34	16.94	0.10	5.64	0.36	38.47
		AVG	0.08	12.64	0.08	2.16	0.08	26.30
		SUM	0.18	5.07	0.56	0.64	0.18	5.20
	Ortalama		0.20	11.55	0.25	2.81	0.21	23.32
	HLF	ZER	0.09	17.38	0.11	4.91	0.09	35.89
		AVG	0.47	11.51	0.20	4.52	0.25	24.56
		SUM	0.10	17.12	0.20	0.87	0.15	6.09
	Ortalama		0.22	15.34	0.17	3.43	0.16	22.18
	INF	ZER	0.09	21.06	0.09	5.16	0.08	47.09
		AVG	0.08	21.19	0.14	3.44	0.08	46.19
		SUM	0.08	6.65	0.10	1.27	0.06	9.82
	Ortalama		0.08	16.30	0.11	3.29	0.07	34.37
Ortalama			0.17	14.40	0.17	3.18	0.15	26.62
Genel Ortalama			0.18	18.68	0.18	4.77	0.20	27.05

Çizelge 5.4’de sırasıyla C, R ve RC tipi dar ve geniş zaman pencereli test problemleri ile kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin kısmi doğrusal gevşetmesi (KDG) kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu tablodan görüleceği gibi dar zaman pencereli problemler ortalama 0.23 saniye gibi çok kısa bir süre içerisinde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalar göstererek çok iyi sonuçlara ulaşmıştır, bu durum en iyi R tipi problemlerde gözlenmektedir. Geniş zaman penceresine sahip problemlerde ise genel olarak 0.17 saniye gibi çok kısa sürelerde en iyi çözümlerden makul düzeyde sapmalarla yine çok iyi sonuçlara ulaşılmış fakat R tipi problemlerde

C ve RC tipi problemlere göre daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. R tipi problemler geniş ve dar zaman pencerelerinin ikisinde de çok kısa sürede iyi sonuçlara ulaşmıştır. Geniş zaman penceresine sahip olan problemler, dar zaman penceresine sahip olan problemlere göre daha kısa sürede en iyi çözümlere daha fazla yaklaşmıştır. Depo kapasiteleri dikkate alındığında ise kapasitenin toplam talebin iki katı olduğu “HLF” durumların diğer durumlara göre gene olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş, kapasitelerin toplam talebin 4 katı olduğu “QRT” durumların ise sınırsız kapasiteye nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tüm problem tipleri incelendiğinde ise depo sabit maliyetlerinin toplam uzaklık olarak alındığı “SUM” durumların diğer durumlara göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yöntem; daha önce kullanılan matematiksel model ve diğer gevşetme teknikleri ile birlikte değerlendirildiğinde çok kısa sürede en iyi çözümlere çok yakın sonuçlar vermiş ve en etkili yöntem olarak öne çıkmıştır.

Ele aldığımız tüm yöntemlerle ilgili genel bir çıkarım yapacak olursak; matematiksel model 1 saatlik bir koşum sonucunda sınırlı sayıda problemde en iyi çözüme ulaşmıştır. Doğrusal gevşetme çok kısa sürede en iyi çözümlere yakın sonuçlar vermiş, kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin doğrusal gevşetmesi yine çok kısa sürede bu iki modele nazaran daha iyi sonuçlar vermiş, son olarak da kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin kısmi doğrusal gevşetmesi diğer gevşetme tekniklerine nazaran biraz daha uzun süre zarfında en iyi çözümlere en yakın sonuçları vermiştir. Geniş zaman pencereli problemler, dar zaman pencereli problemlere nazaran daha iyi sonuçlar vermiştir ve gerçek hayatta da beklenen durum bu şekildedir. Depo kapasiteleri “HLF” ve “INF” olan problemlerin genelde daha iyi sonuçlar verdiği ve sabit depo maliyetlerinin de “SUM” olduğu problemlerin diğer problem tiplerine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Gerçek hayat problemleri ele alındığı zaman; bizlere en kısa sürede en iyi ya da en iyiye yakın sonuçları verecek olan tekniklerin tercih edileceği yadsınamaz bir gerçektir. Bu sebeple “kuvvetlendirilmiş matematiksel modelin kısmi doğrusal gevşetmesi” seçmemiz gereken teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, ARP'nin şu ana kadar literatürde incelenmemiş ve pratikte karşılaşılabilen bir tipi olan HZP_YSARP ele alınmıştır. Bu problemin öncelikle tanımı yapılmış ve bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, çeşitli eşitsizliklerin eklenmesi ve bazı kısıtların gevşetilmesi suretiyle kuvvetlendirilmiş, bu yollarla elde edilen tüm teknikler literatürdeki test problemleri üzerinde test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışma neticesinde literatürde daha önce çalışılmamış fakat gerçek hayatta karşılaşılan “Askeri lojistik üslerinin kurulması ve hizmet planlaması, yolların belirli saatler dahilinde kullanıldığı bölgelere tesis kurma ve dağıtım ağlarını planlama” gibi özel durumlar için optimal çözüme çok kısa süre içerisinde çok yakın sonuçlar üreten bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar göz önünde bulundurularak ileride yapılabilecek çalışmalar aşağıda verilmektedir.

1. Sezgisel bir algoritma geliştirilip bir alt sınır elde edilerek geliştirilmiş ve gevşetilmiş olan matematiksel modellerin performansları değerlendirilebilir.
2. Farklı sezgisel algoritmalar geliştirilip (Tabu arama, tavlama benzetimi, karınca kolonileri eniyilemesi vb.) elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak hangi sezgiselin problemimize daha iyi sonuçlar vereceği belirlenebilir.
3. Probleme gerçek hayatta karşılaşılan farklı bir kısıt eklenerek (Topla-dağıt problemi gibi) yine literatürde daha önce çalışılmamış bir probleme çözüm geliştirilebilir, sezgisel algoritmalar yardımıyla hangi tekniğin oluşturacağımız probleme daha iyi sonuçlar vereceği karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

Achuthan, N.R., Caccetta, L., Hill, S.P., "An improved branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem", *Transportation Science*, 37(2): 153-169 (2003).

Araque, J., Kudva, G., Morin, T.L., Pekny, J.F., "A branch-and-cut algorithm for vehicle routing problems", *Annals of Operations Research*, 50(1): 37-59 (1994).

Augerat, P., Belenguer, J.M., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., "Separating capacity constraints in the cvrp using tabu search", *European Journal of Operational Research*, 106(2-3): 546-557 (1998).

Balakrishnan, N., "Simple heuristics for the vehicle routing problem with soft time windows", *Journal of the Operational Research Society*, 44(3): 279-287 (1993).

Bent, R., Van Hentenryck, P., "A two-stage hybrid local search for the vehicle routing problem with time windows", *Transportation Science*, 38(4): 515-530 (2004).

Berger, J., Barkaoui, M., Bräysy, O., "A route-directed hybrid genetic approach for the vehicle routing problem with time windows", *INFOR Journal*, 41(2): 179-194 (2003).

Berger, J., Salois, M., Begin, R., "A hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows", *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1418: 114-127 (1998).

Brandão, J., "Metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows", *Meta-heuristics - Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, 19-36 (1999).

Bräysy, O., "A reactive variable neighborhood search for the vehicle-routing problem with time windows", *INFORMS Journal on Computing*, 15(4): 347-368 (2003).

Bräysy, O., Gendreau, M., "Vehicle routing problem with time windows, part i: Route construction and local search algorithms", *Transportation Science*, 39(1): 104-118 (2005a).

Bräysy, O., Gendreau, M., "Vehicle routing problem with time windows, part ii: Metaheuristics", *Transportation Science*, 39(1): 119-139 (2005b).

Bullnheimer, B., Hartl, R.F., Strauss, C., "An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem", *Annals of Operations Research*, 89: 319-328 (1999).

Caseau, Y., Laburthe, F., Silverstein, G., "A meta-heuristic factory for vehicle routing problems", *Proceedings Fifth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP '99)*, 144-158 (1999).

Chiang, W.C., Russell, R.A., "A reactive tabu search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows", *INFORMS Journal on Computing*, 9(4): 417-430 (1997).

Clarke, G., Wright, J.W., "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, 12(4): 568-581 (1964).

Cordeau, J.F., Laporte, G., Mercier, A., "A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows", *Journal of the Operational Research Society*, 52(8): 928-936 (2001).

Dantzig, G.B., Ramser, J., "The truck dispatching problem", *Management Science*, 6: 80-88 (1959).

Desrochers, M., Laporte, G., "Improvements and extensions to the miller-tucker-zemlin subtour elimination constraints", *Operations Research Letters*, 10(1): 27-36 (1991).

Desrochers, M., Lenstra, J.K., Savelsbergh, M.W.P., Soumis, F., "Vehicle routing with time windows: Optimization and approximation", Editörler: Golden, B.L., Assad, A.A., *North-Holland*, Amsterdam, 65-84 (1988).

Gambardella, L.M., Taillard, E., Agazzi, G., "Macs-vrptw: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows", *New Ideas in Optimization*, 63-76 (1999).

Garcia, B.L., Potvin, J.Y., Rousseau, J.M., "A parallel implementation of the tabu search heuristic for vehicle routing problems with time window constraints", *Computers and Operations Research*, 21(9): 1025-1033 (1994).

Gehring, H., Homberger, J., "A parallel hybrid evolutionary metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows", *Proceedings of EUROGEN99*, 57-64 (1999).

Gehring, H., Homberger, J., "A parallel two-phase metaheuristic for routing problems with time windows", *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 18(1): 35-47 (2001).

Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, 178: 699-717 (1994).

Homberger, J., Gehring, H., "Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows", *Infor*, 37(3): 297-318 (1999).

Homberger, J., Gehring, H., "A two-phase hybrid metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows", *European Journal of Operational Research*, 162(1): 220-238 (2005).

Ibaraki, T., Imahori, S., Kubo, M., Masuda, T., Uno, T., Yagiura, M., "Effective local search algorithms for routing and scheduling problems with general time window constraints", *Transportation Science*, 39(2): 206-232 (2002).

Jung, S., Moon, B.R., "A hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows", *GECCO 2002: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1309-1316 (2002).

Labbe, M., Rodríguez-Martin, I., Salazar-González, J. J., "A branch-and-cut algorithm for the plant-cycle location problem", *Journal of the Operational Research Society*, 55(5): 513-520 (2004).

Laporte, G., "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms", *European Journal of Operational Research*, 59(3): 345-358 (1992).

Laporte, G., Desrochers, M., Nobert, Y., "Two exact algorithms for the distance-constrained vehicle routing problem", *Networks*, 14(1): 161-172 (1984).

Lau, H.C., Sim, M., Teo, K.M., "Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles", *European Journal of Operational Research*, 148(3): 559-569 (2003).

Lysgaard, J., Letchford, A.N., Eglese, R.W., "A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem", *Math. Program.*, 100(2): 423-445 (2004).

Mester, D., "An evolutionary strategies algorithm for large scale vehicle routing problem with capacitate and time window restrictions", *Teknik Rapor, Israil*, 7-11 (2002).

Potvin, J.Y., Bengio, S., "The vehicle routing problem with time windows part ii: Genetic search", *INFORMS Journal on Computing*, 8(2): 165-172 (1996).

Potvin, J.Y., Rousseau, J.M., "A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows", *European Journal of Operational Research*, 66(3): 331-340 (1993).

Prins, C., "A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem", *Computers and Operations Research*, 31(12): 1985-2002 (2004).

Ralphs, T.K., "Parallel branch and cut for capacitated vehicle routing", *Parallel Computing*, 29(5): 607-629 (2003).

Rego, C., Roucairol, C., "A parallel tabu search algorithm using ejection chains for the vehicle routing problem". Editörler: Osman, I., Kelly, J., **Kluwer**, Boston, 56-95 (1996).

Rochat, Y., Taillard, E.D., "Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing", **Journal of Heuristics**, 1(1): 147-167 (1995).

Salhi, S., Nagy, G., "Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries", **European Journal of Operational Research**, 162: 126-141 (2005).

Schmitt, L.J., "An empirical computational study of genetic algorithms to solve order-based problems: An emphasis on the tsp and the vrp with time constraints", Doktora Tezi, **University of Memphis, Fogelman College of Business and Economics**, 56-64 (1994).

Schulze, J., Fahle, T., "A parallel algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints", **Annals of Operations Research**, 86: 585-607 (1999).

Solomon, M.M., "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints", **Operations Research**, 35(2): 254-265 (1987).

Solomon, M.M., Derosiers, J., "Time window constrained routing and scheduling problems", **Transportation Science**, 22(1): 1-13 (1988).

Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.Y., "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows", **Transportation Science**, 31(2): 170-186 (1997).

Taillard, R.E., "Parallel iterative search methods for vehicle routing problems", **Networks**, 23: 661-673 (1993).

Tan, K.C., Lee, L.H., Ou, K., "Artificial intelligence heuristics in solving vehicle routing problems with time window constraints", **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 14(6): 825-837 (2001).

Tan, K.C., Lee, L.H., Zhu, K.Q., Ou, K., "Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows", **Artificial Intelligence in Engineering**, 15(3): 281-295 (2001).

Thangiah, S.R., "An adaptive clustering method using a geometric shape for vehicle routing problems with time windows", **Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms**, 536-543 (1995a).

Thangiah, S.R., "Vehicle routing with time windows using genetic algorithms", **Application Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers**, 2: 253-277 (1995b).

Thangiah, S.R., Gubbi, A.V., "Effect of genetic sectoring on vehicle routing problems with time windows", ***Proceedings of the IEEE International Conference on Managing Intelligent System Projects***, Washington, 146-153 (1993)

Thangiah, S.R., Nygard, K.E., Juell, P.L., "Gideon: A genetic algorithm system for vehicle routing with time windows", ***Proceedings of the Seventh Conference on Artificial Intelligence Applications***, 322-328 (1991).

Thangiah, S.R., Osman, I.H., Sun, T., "Hybrid genetic algorithms, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows", ***Teknik Rapor, Canterbury, UK***, 20-24 (1994).

Thangiah, S.R., Vinayagamoorthy, R., Gubbi, A.V., "Vehicle routing with time deadlines using genetic and local algorithms", ***Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms***, Los Altos, 506-515 (1993)

Toth, P., Vigo, D., "An overview of vehicle routing problems", Editorler: Toth, P., Vigo, D., ***SIAM***, Philadelphia, 1-26 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÇETİNKAYA Cihan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum Tarihi ve Yeri : 30/06/1984 Malatya
 Medeni Hali : Bekâr
 Telefon : 0505 666 22 65
 e-mail : cihancetinkaya1903@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Y.Lisans	Gazi Üniversitesi	10.01.2011
Lisans	Kara Harp Okulu	30.08.2006
Lise	Maltepe Askeri Lisesi	30.06.2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2008-2012	J.Loş.K.lığı ANKARA	İş Plan Kontrol Ks.A.
2006-2008	J.Loş.K.lığı ANKARA	Silah Yenileme Ks.A.

Yabancı Dil

İngilizce, Bulgarca

Hobiler

Futbol, Sinema,