

**MALİYET ODAKLI ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE
KAPASİTELİ İNTERMODAL ANA DAĞITIM ÜSSÜ AĞLARI
TASARIMI**

ELİF ZEYNEP SERPER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2014

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Tahir HANALIOĐLU

Anabilim Dalı Başkanı

ELİF ZEYNEP SERPER tarafından hazırlanan MALİYET ODAKLI ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE KAPASİTELİ İNTERMODAL ANA DAĞITIM ÜSSÜ AĞLARI TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Doç. Dr. Oya KARAŞAN

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER

Üye: Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV

TEZ BİLDİRİMİ

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

Elif Zeynep SERPER

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Nisan 2013

ELİF ZEYNEP SERPER

**MALİYET ODAKLI ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE
KAPASİTELİ İNTERMODAL ANA DAĞITIM ÜSSÜ AĞLARI
TASARIMI**

ÖZET

Günümüzün rekabetçi ortamında, kargo sektöründe hizmet veren pek çok firma ana dağıtım üssü (ADÜ) ağlarında intermodal taşımacılık ve farklı tip araçlar kullanarak birim ulaşım maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır. Farklı ulaşım yolları ve farklı kapasitede araçların olduğu ADÜ yer seçimi ve intermodal ADÜ ağları tasarımı problemi literatürde daha önce ele alınmamıştır. Bu çalışmada, ADÜ ağı tasarımı için farklı ulaşım yolları ve farklı kapasitelerde araçlar kullanılmasına izin verilmektedir. Bu kapsamda, ADÜ'ler için yer seçimi, talep noktalarının ADÜ'lere atanması, ADÜ'ler arasında hangi ulaşım yolunda, hangi tip ve kaç adet aracın hizmet vereceği kararları üzerinde çalışılmaktadır. Bu kararlar verilirken amaç ADÜ açma maliyetleri, ulaşım maliyetleri, araç işletme maliyetleri, araç kiralama maliyetleri ve elleçleme maliyetlerini içeren toplam maliyetin en küçüklenmesidir. Ele alınan problem için karma tamsayılı bir matematiksel model oluşturulmuş ve problemin çözümü için yerel arama bazlı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma Türkiye ve CAB veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Problem parametreleri Türkiye'de hizmet veren üç büyük kargo şirketi ile gerçekleştirilen görüşmeler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Problem parametrelerindeki değişikliklerin ADÜ ağları üzerine olan etkilerini incelemek için kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ADÜ yer seçimi, ADÜ ağı tasarımı, servis ağı tasarımı, intermodal taşımacılık ağları.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Industrial Engineering
Supervisor : Assist. Prof. Sibel ALUMUR ALEV
Degree Awarded and Date : M.Sc. – April 2013

ELİF ZEYNEP SERPER

**HUB LOCATION AND THE DESIGN OF CAPACITATED INTERMODAL
HUB NETWORKS FOCUSING ON COSTS**

ABSTRACT

In today's competitive environment, in order to decrease unit transportation costs, most firms in the cargo delivery sector use different transportation modes and different types of vehicles within their intermodal hub networks. Hub location and hub network design problems considering different transportation modes and different types of vehicles have not been addressed in the literature. In this study, we allow using different transportation modes and different types of vehicles in the hub network to be designed. We determine the location of the hubs, the allocation of demand nodes to these hubs, the hub links to be established between the hubs, and the type and number of vehicles that will serve on these hub links. The objective of the problem is to minimize total costs including the hub establishment costs, transportation costs, vehicle operating costs, vehicle renting costs, and material handling costs. A mixed-integer programming model is developed and a local search based heuristic algorithm is proposed for the solution of this problem. The heuristic algorithm is tested on the Turkish network and CAB data sets. The values of the problem parameters are determined based on the interviews made with the three largest cargo companies operating in Turkey. Extensive computational analyses are conducted in order to observe the effects of changes in the various problem parameters on the resulting hub networks.

Keywords: hub location, hub network design, service network design, intermodal transportation networks.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilimsel ve mesleki anlamda beni yönlendiren, düzenli olarak her hafta bana zaman ayırıp, desteğini her zaman hissettiren, bilimselliği ve insani değerleri ile örnek aldığım, çok değerli hocam ve tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV'e,

Lisans ve yüksek lisans eğitimimde bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, yüreklendirici sözleri ile daima desteğini hissettiğim Yrd. Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER'e, tez jüri üyeliğini kabul ederek beni onurlandıran Doç. Dr. Oya KARAŞAN'a,

2006 yılında girdiğim, lisans ve yüksek lisans mezunu olmaktan gurur duyduğum TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesine, kıymetli tecrübe ve bilgileriyle benim gibi pek çok öğrencinin yetişmesine katkı sağlayan başta TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri olmak üzere tüm hocalarıma, 111M553 sayılı projedeki desteği ile bu çalışmanın yapılmasını sağlayan TÜBİTAK'a ve bu projede beraber çalıştığım arkadaşım Saliha ALTUNTAŞ'a

Birlikte ders alıp, çalıştığımız, aynı yollardan geçtiğimiz, iyi ve kötü günlerimizi paylaştığımız sevgili çalışma arkadaşlarıma, en samimi duygular ile dostluğunu paylaştığım ve canım arkadaşım Duygu ERSOL'a, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım çok sevgili arkadaşım İlkcan KELEŞ'e,

Kendimi bildiğim bileli tanıdığım, hayatımın her döneminde özellikle de meslek seçimi aşamasında öngörü, yorum ve düşünceleri ile büyük desteğini gördüğüm, kişiliği ve hayat görüşü ile de örnek aldığım aile dostumuz sevgili Doç. Dr. Halis GÜNEL'e ve sayesinde tanıdığım yol gösterici düşünceleri ile bana büyük moral desteği veren sevgili Şenol TUNÇ'a,

Tandığım için kendimi şanslı hissettiğim, varlığı ile bana mutluluk veren ve beni bazen benden daha iyi anlayan, değer verip, kıymet bilen, vefalı, benim de her zaman kıymetini bilmek isteyeceğim Kadir Eray DOĞANLAR'a,

Hayatta en önemli olan şeyin sevgi, dürüstlük, çalışkanlık ve vefa duygusu olduğunu öğreten, bana duydukları güvenden güç aldığım annem Hande SERPER ve babam Ahmet SERPER'e, bana çok büyük emeği geçen anneannem Ayla ÖZÖN, babaannem Nurten SERPER ve dedelerim Hüseyin ÖZÖN ve Hasan Basri SERPER'e,

Ve burada tek tek sayamadığım hayatıma girmiş olan herkese sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|----|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 2 GERÇEK HAYAT GÖZLEMLERİ | 3 |
| 2.1 Aras Kargo | 3 |
| 2.2 Yurtiçi Kargo | 5 |
| 2.3 MNG Kargo | 6 |
| 2.4 Sentez | 7 |
| 3 LİTERATÜR TARAMASI | 11 |
| 3.1 ADÜ Yer Seçimi | 11 |
| 3.2 ADÜ Yer Seçimi ve ADÜ Ağı Tasarımı | 14 |
| 3.3 İntermodal Ağlarda ADÜ Yer Seçimi ve ADÜ Ağları Tasarımı | 17 |
| 3.4 Servis Ağı Tasarımı | 18 |
| 3.5 ADÜ Yer Seçimi Problemleri İçin Önerilen Sezgisel Algoritmalar | 19 |
| 3.6 Sentez | 24 |
| 4 PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL | 25 |
| 4.1 Problem Tanımı | 25 |
| 4.2 Matematiksel Model | 26 |
| 5 SEZGİSEL ALGORİTMA | 31 |
| 6 SEZGİSEL ALGORİTMANIN UYGULAMASI | 40 |
| 6.1 Problem Verileri | 40 |
| 6.2 Sezgisel Algoritmanın Performansı | 45 |
| 6.3 İstatistiksel Analiz | 55 |
| 6.4 Alt Sınır | 57 |
| 7 PROBLEMİN TÜRKİYE İÇİN UYGULAMASI VE DUYARLILIK ANALİZLERİ | 59 |
| 8 SONUÇLAR | 70 |
| KAYNAKLAR | 72 |
| EKLER | 77 |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

TABLULARIN LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Kargo şirketlerinin transfer merkezi yerlerinin karşılaştırılması..... | 9 |
| Tablo 3.1: ADÜ yer seçimi problemi için geliştirilmiş olan sezgisel algoritmalar. ... | 20 |
| Tablo 6.1: Kümelere ait bilgiler. | 41 |
| Tablo 6.2: Farklı araç tiplerine ait kapasite ve maliyet değerleri. | 42 |
| Tablo 6.3: ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları. | 43 |
| Tablo 6.4: 16 il ile gerçekleştirilen analizlerde ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları. | 44 |
| Tablo 6.5: Yüksek kapasite kümesi ile 6000 çözüm üretildiği durum. | 46 |
| Tablo 6.6: Yüksek kapasite kümesi ile 12000 çözüm üretildiği durum. | 48 |
| Tablo 6.7: Düşük kapasite kümesi ile 6000 çözüm üretildiği durum. | 49 |
| Tablo 6.8: Düşük kapasite kümesi ile 12000 çözüm üretildiği durum..... | 50 |
| Tablo 6.9: Farklı kapasiteler ve farklı çözüm sayıları ile elde edilen ortalama değerler. | 52 |
| Tablo 6.10: CAB verisi ile 12000 çözüm üretildiği durum. | 53 |
| Tablo 6.11: CAB verisi ile 24000 çözüm üretildiği durum. | 54 |
| Tablo 6.12: CAB verisi ile farklı çözüm sayıları ile elde edilen ortalama değerler. ... | 54 |
| Tablo 6.13: Faktörlere ait p-değerleri. | 56 |
| Tablo 6.14: Yüksek kapasite kümesi ile alt sınırın optimal çözümlerden uzaklığı. ... | 58 |
| Tablo 6.15: Düşük kapasite kümesi ile alt sınırın optimal çözümlerden uzaklığı. | 58 |
| Tablo 7.1: ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları. | 59 |
| Tablo 7.2: ADÜ kapasitelerinin yüksek olduğu durumda sabit ADÜ açma maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi. | 60 |
| Tablo 7.3: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda sabit ADÜ açma maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi. | 62 |
| Tablo 7.4: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda sahip olunan araç sayısında yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi. | 64 |
| Tablo 7.5: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda araç kiralama maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi. | 66 |
| Tablo 7.6: Düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli örnekte ADÜ'ler arasında hizmet veren araçların sayıları. | 68 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 5.1: Algoritma 1: Genel Algoritma akış şeması..... | 32 |
| Şekil 5.2: Komşuluk üretme teknikleri. | 34 |
| Şekil 5.3: Komşuluk üretim yapısı. | 36 |
| Şekil 6.1: Kullanılan 16 noktanın Türkiye haritası üzerinde gösterimi. | 44 |
| Şekil 7.1: Düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli örneğin Türkiye haritası üzerinde gösterimi. | 67 |

EKLERİN LİSTESİ

| | |
|---|----|
| EK 1: Türkiye’de bazı iller arasında dosya taşımacılığında ücret (TL) ve süre (saat) karşılaştırılması (Mayıs 2013 itibari ile) | 77 |
| EK 2: Türkiye 16 il ve CAB veri kümeleri ile gerçekleştirilen analizler | 78 |

1 GİRİŞ

Kargo taşımacılığında amaç maliyeti düşük, hızlı ve kaliteli hizmet verebilmektir. Müşteri için teslimat süresi ve güvenilirlik çok önemlidir. Dolayısı ile şirketlerin amacı kargoları zamanında ve hasarsız olarak müşterilere ulaştırabilmektir. Şirketler bu hizmeti mümkün olan en düşük maliyetle gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır.

Kargo taşımacılığında ana dağıtım üsleri (ADÜ) aktarma, ayırma ve birleştirme gibi işlemleri gerçekleştirmekte böylelikle akışı toplayıp ölçek ekonomilerinden yararlanmaktadır. ADÜ yer seçimi problemleri, ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi ve talep noktalarının ADÜ'lere atanması problemlerini içermektedir. ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemlerinde ise ADÜ'lerin yerlerine ve talep noktalarının hangi ADÜ'lere atanacağına karar verildiği gibi, hangi ADÜ'ler arasında direkt bağlantıların kurulup kurulmayacağına ve ADÜ'ler arasındaki akışların hangi rotalardan gideceğine de karar verilmektedir. Yani, ADÜ yer seçimi kararlarına, ADÜ ağı tasarımı ve akış rotalama kararları da eklenmektedir. ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemlerinin kargo taşımacılığı, havayolu yolcu taşımacılığı ve telekomünikasyon alanlarında çok çeşitli uygulamaları mevcuttur.

Bu çalışmada, kargo firmalarının gerçekleştirdiği küçük paket ve dosya taşımacılığı ele alınmaktadır. Bu kapsamda, birden fazla ulaşım yolunun kullanılabilirdiği bir sistemde ADÜ yerlerinin belirlenmesi, talep noktalarının ADÜ'lere atanması, ADÜ ağının tasarımı ve bu ağda hizmet verecek araçların seçimi kararları üzerinde çalışılmaktadır.

Sekiz bölümde incelenen bu tez çalışmasının bir sonraki bölümünde yapılan gerçek hayat gözlemleri sonucu kargo firmalarından elde edilen bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde ele alınan problem ile ilgili daha önce yapılmış olan benzer çalışmaların incelendiği literatür taraması yer almaktadır. Dördüncü bölümde, problem tanımı ve problemin çözümü için geliştirilmiş olan karma tamsayılı matematiksel model sunulmaktadır. Ele alınan problem için geliştirilen sezgisel

algoritma beşinci bölümde anlatılmaktadır. Altıncı bölümde, sezgisel algoritmanın uygulaması üzerinde durulmaktadır. Bu bölümde problem verilerinin ne şekilde belirlendiği anlatılmakta, sezgisel algoritmanın performansı değerlendirilmekte ve istatistiksel analiz sunulmaktadır. Yedinci bölümde ise problemin Türkiye verisi ile çözümünden elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Son bölüm olan sekizinci bölümde bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara ait yorumlar sunulmaktadır. Probleme yönelik yapılabilecek gelecek çalışmalara dair öneriler de son bölümde yer almaktadır.

2 GERÇEK HAYAT GÖZLEMLERİ

Kargo firmalarının yapıları ve işleyiş şekilleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için Türkiye’de hizmet veren üç büyük kargo firmasına ait transfer merkezlerine ve şubelere ziyaretler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde Aras Kargo, Yurtiçi Kargo ve MNG Kargo firmalarına yapılan ziyaretler sonucu elde edilen bilgiler yer almaktadır. Çalışmamızda küçük paket ve dosya taşımacılığı ele alındığından bu kısımda sunulan bilgiler bu uygulamalar üzerinedir.

İncelenmiş olan tüm şirketlerde kargo taşımacılığı benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Gün boyu şubelerde biriken kargolar, kargo alımı sona erdikten sonra şubenin bağlı olduğu transfer merkezine gönderilir. Transfer merkezine ulaşan kargolar teslimat adreslerine göre ayrıştırılır ve ilgili transfer merkezine gidecek olan araca yüklenir. Teslimatın yapılacağı şubenin bağlı olduğu transfer merkezine ulaşan kargolar bu sefer şubelere göre ayrıştırılır ve ilgili şubelere gönderilir. Firmalara ait detaylı bilgiler aşağıda farklı başlıklar altında verilmektedir.

2.1 Aras Kargo

1989 yılından beri hizmet veren Aras Kargo’nun Türkiye çapında 19 bölge müdürlüğü, 27 transfer merkezi, 790 şubesi bulunmaktadır. 3000 araçlık filosu ve 8800 çalışanı ile 1500’ü aşkın yerleşim biriminde her ay yaklaşık 6 milyon kişiye hizmet vermektedir.

600 km’den kısa mesafelere standart olarak 24 saatte hizmet verilebilmektedir. 600 km’den uzun mesafelerde ise hizmet süresi 48 saate çıkmaktadır ancak kullanılabilir farklı hizmet seçenekleri ile bu süre kısaltılabilmektedir.

Üç ayrı servis seviyesi bulunmaktadır, bunlar pahalıdan ucuza doğru Günaydın Kargo, Uçak Kargo ve Standart kargo şeklindedir. Günaydın Kargo ile gönderiler ertesi sabah en geç 10:00’a kadar teslim edilmektedir. Teslim süresi 24 saat olan iller

ve 10 kg'ın altındaki gönderiler için bu hizmet kullanılabilir. Uçak Kargo ile teslimat süresinin 48 saat olduğu, hava taşımacılığına müsait olan iller için uçak kullanılarak 24 saatte teslimat yapılabilir.

Aras kargonun hizmet ağında, tüm transfer merkezleri arasında direkt bağlantı bulunmamaktadır. Coğrafi konumdan dolayı uğramalı hatlar oluşabilmektedir. Örneğin Ankara'dan Van'a gidecek olan araçta eğer boş yer var ise bu araç Malatya ve Kayseri'ye de uğrayabilmektedir. Her şube yalnızca bir adet transfer merkezine bağlıdır ve şubeler arasında direkt bağlantı mevcut değildir.

Şubeler ile transfer merkezleri arasında genel olarak 3000 desilik kapalı kasa kamyonetler ve 2000 desilik daliler çalışmaktadır. Transfer merkezleri arasında ise 3000-5000 desilik kamyonlar, 17.000 desilik büyük kamyonlar ve 21.000 desilik kırkayaklar kullanılmaktadır. Desi taşımacılıkta kullanılan ve hacimsel ağırlık anlamına gelen bir ölçü birimidir. Bir paketin en, boy ve yüksekliğinin cm cinsinden birbiriyle çarpılıp 3000'e bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Uçak hizmeti sağlayabilmek için THY'nin uçakları kullanılmaktadır. Araçların yetmemesi durumunda araç kiralanarak gönderim gerçekleştirilmektedir.

Sabah transfer merkezlerine gelen kargoları şubelere bir önceki akşam şubeden kargoları getirmiş olan araç götürmektedir. Uzak transfer merkezlerinden gelen kargoları şube araçları beklememekte, bu kargoların şubelere götürülmesinde "ring" araçları devreye girmektedir. Şubelere kargoları bırakan ring araçları aynı zamanda bir önceki gün yetişemeyen kargoları da alıp transfer merkezine getirmektedir. Ring araçlarının bir diğer görevi ise yanlış şubeye gönderilmiş olan kargoları transfer merkezine geri getirip, gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra öğleden sonraki ring araçları ile doğru şubeye iletmeştir.

2.2 Yurtiçi Kargo

1982 yılında Türkiye'nin ilk kargo şirketi olarak kurulmuş olan Yurtiçi Kargo'nun bugün Türkiye genelinde ve K.K.T.C'de 12.000 personeli, 915 şubesi, 31 transfer merkezi ve 2600'ü aşkın araç filosu mevcuttur.

Standart olarak 600 km'nin altındaki mesafeler için bir iş günü, 600 km'nin üstü mesafelerde ise iki iş gününde hizmet verilmektedir. Ayrıca, müşterilerin daha hızlı gönderi talebi durumunda kullanabileceği hizmetler de mevcuttur. VIP 24 hizmeti ile teslimat süresi 48 saat olan illere 24 saatte teslimat gerçekleştirilmektedir. VIP Çeyrek ile aynı gün içerisinde akşama kadar teslimat gerçekleştirilmektedir. VIP Şehirçi hizmeti ile Ankara, İstanbul ve İzmir'de öğlene kadar şubeye teslim edilmiş olan kargoların teslimatı yapılmaktadır. VIP Air Taxi hizmetinde ise gönderiler özel helikopter ile taşınmaktadır. VIP hizmetleri tüm şehirler arasında kullanılmamakta ve bu hizmeti sunabilmek için ayrı bir ekip çalışmaktadır.

Ankara ve Düzce'de bulunan transfer merkezleri Yurtiçi Kargo'nun merkezi transfer merkezleridir. Yurtiçi Kargo'nun hizmet ağında bu iki transfer merkezinden tüm transfer merkezlerine direkt bağlantı mevcuttur. Bunlar dışındaki transfer merkezleri arasında ise direkt ve direkt olmayan hatlar mevcuttur. Transfer merkezine gelen kargo miktarına bağlı olarak bu karar günlük olarak verilmekte ve genellikle sezonlara göre rotalar değişkenlik göstermektedir. Bir kamyonun uğrayabileceği transfer merkezi sayısında bir sınırlama yoktur ancak genellikle bu rakam üçü geçmemektedir.

Kırşehir'de bulunan şubeler dışındaki tüm şubeler tek bir transfer merkezine bağlı iken Kırşehir şubeleri batısındaki bölgelere gidecek olan kargolarını Ankara transfer merkezine, doğusundaki bölgelere gidecek olanları ise Kayseri transfer merkezine göndermektedir. Şubeler genellikle kendilerine en yakın olan transfer merkezine bağlıdır ancak istisnai bir durum olarak Sungurlu Merzifon'a daha yakın olmasına rağmen Ankara transfer merkezine bağlıdır.

Şubelerden transfer merkezlerine kargo taşıma amaçlı olarak 3,5-12,6 tonluk kamyonetler kullanılmaktadır. Nadiren bu kamyonetler transfer merkezleri arasında da kullanılabilir. Transfer merkezleri arasında genel olarak 12 ton'dan büyük araçlar kullanılmaktadır. Talebin çok yoğun olduğu iller arasında römorklu tırlar da kullanılabilir. Uçak ile gönderilecek olan kargolar için THY'nin uçakları kullanılmaktadır. Araçların yetmemesi durumunda sözleşmeli olunan firmalardan araç kiralanmaktadır.

2.3 MNG Kargo

2003 yılından beri hizmet veren MNG Kargo'nun Türkiye genelinde 26 transfer merkezi, 720 şubesi, 2000 araçlık kara yolu filosu ve sekiz uçağı ve 6000 çalışanı bulunmaktadır. Türkiye'de kendi uçak filosu ile hava kargo taşımacılığı yapan ilk ve tek kargo şirketidir. Transfer merkezi teknolojisi olarak Türkiye'de en gelişmiş olan firmadır. Transfer merkezlerinde kargoların ayrıştırılması bantlı sistem ile el terminaleri kullanılmadan otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

600 km'ye kadar olan mesafelerde teslimat 24 saat içerisinde gerçekleştirilirken, 600 km'nin üzerinde teslimat süresi 48 saate çıkmaktadır. Ancak, müşteri isteğı doğrultusunda kullanılacak Güniçi, Güniçi Komşu, Güniçi İstanbul ve Güniçi TR gibi bazı özel hizmetler mevcuttur. Güniçi ile hava taşımacılığına uygun olan gönderiler yarım günde teslim edilmektedir. Güniçi Komşu hizmeti ile yakın yerlere mesai saatleri içerisinde kargo ulaştırılmaktadır. Güniçi İstanbul hizmeti ile İstanbul'a gönderilecek olan kargolar mesai saatleri içinde teslim edilmektedir. Güniçi TR hizmeti ile ise 600 km'nin üzerindeki mesafelerde hava taşımacılığına uygun olan gönderiler 24 saat içerisinde teslim edilmektedir.

Aras ve Yurtiçi Kargo'daki gibi tüm transfer merkezleri arasında direkt bağlantı bulunmamaktadır. Ayrıca, her şube yalnızca bir adet transfer merkezine bağlıdır ve şubeler arasında direkt bağlantı bulunmamaktadır.

MNG Kargonun FedEx ile anlaşması bulunmaktadır. FedEx'in kargolarını taşıırken kendi uçak filosunu kullanmaktadır. Ayrıca, İstanbul-Ankara, İstanbul-Van, İstanbul-Adana, İstanbul-Hatay, İstanbul-Urfa, İstanbul-Erzurum, İstanbul-Diyarbakır, İstanbul-Trabzon, İstanbul-Samsun, Ankara-Diyarbakır, Ankara-Van, Ankara-Erzurum, İstanbul-Yurt dışı ve Adana-Kıbrıs bağlantılarında da kendi uçak filolarını, bu bağlantılar haricinde ise uçak ile gönderilecek kargolar için THY'nin uçaklarını kullanmaktadırlar. Eğer uçak kullanılacak ise uçak isteği olmayan kargolar da 30 kg'ın altında olmak şartıyla müşteriye sorulmadan uçağa yüklenebilmektedir.

Şubeler ve transfer merkezleri arasında 3,5 tonluk kamyonlar kullanılmaktadır. Transfer merkezleri arasında ise kapasiteleri 10 ila 13 ton arasında değişen üç tip kamyon çalışmaktadır. Kargonun boşaltılacağı transfer merkezi alan olarak yeterli olduğunda tırlar kullanılmaktadır. Direkt olmayan hatlarda römorklu araçlar da kullanılabilir. Talepleri yaklaşık olarak aynı olan transfer merkezleri arasında karşılıklı olarak aynı araçlar çalışırken talepleri çok farklı olanlarda bir araç kesin olarak karşılıklı hareket etmekte, artan kargo ise araç kiralanarak gönderilmektedir. Bu sayede boş araç hareketleri önlenmektedir.

2.4 Sentez

İncelenmiş olan üç kargo firmasında da kargonun taşınması benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Ancak firmalar arasında bazı farklılıklar da mevcuttur. Bu bölümde firmalardan toplanan bilgilerle ilgili bir sentez sunulmaktadır.

Sağlanan hizmetlere bakıldığında tüm şirketlerin bazı gönderiler için belirli iller arasında aynı gün içinde teslimat hizmeti sağladığı görülmektedir. Ayrıca hava yolu taşımacılığı ile dosya ve paket teslimat süreleri 48 saat olan iller için bu süre 24 saate indirilmektedir. Tüm şirketler, en fazla 48 saat içinde tüm iller arasında hizmet verebilmektedir.

Tüm şirketlerin şubeleri arasında 600 km'ye kadar olan mesafelerde 24 saat içinde, 600 km üzeri mesafelerde ise 48 saatte hizmet verilmektedir. Farklı olarak, MNG Kargo 600 km üzeri mesafedeki bazı iller arasında kendi uçak filosu ile hızlı teslimat yapmaktadır.

Şubeler arasında direkt ulaşım izin verilmemektedir. Kargonun bir şubeden diğerine taşınması için mutlaka bağlı olduğu transfer merkezine uğraması gerekmektedir. Nadir durumlarda eğer bir şubeden diğer şubeye, tam dolu bir araç gidecekse, operasyonel bir karar ile sistemden hat açılıp aracın direkt olarak gönderilmesi mümkündür. Ayrıca, her şube tam bir adet transfer merkezine bağlıdır. Bu duruma tek bir istisna Yurtiçi Kargo'nun Kırşehir şubesinde bulunmaktadır.

Tüm transfer merkezleri arasında direkt bağlantı bulunmamaktadır. Örneğin; Aras Kargo'da Ankara'dan Van'a giden kargo Kayseri ve Malatya'ya uğrayabilmektedir. Başka bir örnekte ise; Ankara'dan Antalya'ya bir araç direkt giderken, ikinci araç Afyon'daki transfer merkezine uğrayarak gitmektedir. Yurtiçi Kargo'da sadece Ankara ve Düzcü'den tüm transfer merkezlerine, tüm transfer merkezlerinden de Ankara ve İstanbul'a direkt ulaşım bulunmaktadır. MNG Kargo'da ise İstanbul'dan Erzurum'a kara yolu ile giden kargo Ankara'daki transfer merkezine uğramak zorundadır. İstanbul'dan Sivas hariç her yere direkt ulaşım bulunmaktadır.

Tablo 2.1'de üç kargo şirketine ait transfer merkezlerinin yerleri sunulmaktadır. Şirketlerin transfer merkezlerine bakıldığında MNG Kargo'nun 26, Aras Kargo'nun 27, Yurtiçi Kargo'nun ise 31 transfer merkezi olduğu görülmektedir. En çok transfer merkezine Yurtiçi Kargo sahiptir. Bunun nedeni olarak Yurtiçi Kargo'nun kargo taşıma yoğunluğunun diğer şirketlere göre daha fazla olması gösterilebilir. Şirketlerin transfer merkezlerinin yerleri benzerlik göstermektedir. Öyle ki; Yurtiçi Kargo ve MNG Kargo'nun transfer merkezleri karşılaştırıldığında 23 tanesinin aynı illerde kurulduğu, üç şirketin de İstanbul'da birden fazla transfer merkezi bulundurduğu fakat yerlerinin İstanbul içinde değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Günlük İstanbul'dan Ankara'ya Aras Kargo yaklaşık olarak dört tır, MNG Kargo 10-15 tır, Yurtiçi Kargo ise dördü e-ticaret olmak üzere 20 tır kargo taşımaktadır. Transfer merkezleri arasında günlük taşınan kargo miktarı araç sayısı cinsinden düşünülürse en çok kargoyu Yurtiçi Kargo'nun taşıdığı görülmektedir. Bunun en büyük sebebi Yurtiçi Kargo'nun Avon, Markafoni, Trendyol gibi e-ticaret şirketlerinin kargolarını da taşımasıdır.

Tablo 2.1: Kargo şirketlerinin transfer merkezi yerlerinin karşılaştırılması

| İller | Aras Kargo | Yurtiçi Kargo | MNG Kargo |
|---------------|------------|---------------|-----------|
| Adana | ✓ | ✓ | ✓ |
| Afyon | ✓ | ✓ | ✓ |
| Aksaray | ✓ | ✓ | ✓ |
| Ankara | ✓ | ✓ | ✓ |
| Antalya | ✓ | ✓ | ✓ |
| Balıkesir | ✓ | ✓ | ✓ |
| Bursa | ✓ | ✓ | ✓ |
| Denizli | ✓ | ✓ | ✓ |
| Diyarbakır | ✓ | ✓ | ✓ |
| Düzce | ✓ | ✓ | ✓ |
| Elazığ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Erzurum | ✓ | ✓ | ✓ |
| Eskişehir | ✓ | ✓ | ✓ |
| Gaziantep | ✓ | ✓ | ✓ |
| İstanbul | 4 tane | 5 tane | 3 tane |
| İzmir | ✓ | 2 tane | ✓ |
| Kayseri | ✓ | ✓ | ✓ |
| Kocaeli | ✓ | ✓ | ✓ |
| Konya | ✓ | ✓ | ✓ |
| Malatya | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mersin | ✓ | ✓ | ✗ |
| Merzifon | ✓ | ✓ | ✓ |
| Samsun | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sivas | ✗ | ✓ | ✗ |
| Trabzon | ✓ | ✓ | ✓ |
| Trakya | ✗ | ✓ | ✗ |
| Van | ✓ | ✓ | ✓ |
| Toplam | 27 | 31 | 26 |

Araçların cinsleri tüm şirketlerde benzerlik göstermektedir. Transfer merkezleri ile şubeler arasında minibüs ve kamyonet kullanılmaktadır. Transfer merkezleri arasında

büyükliklerine göre üç veya dört çeşit araç kullanılmaktadır. Bu araçlar kapasitelerine göre sırası ile kamyon, büyük kamyon, kırkayak ve römorklu tır şeklindedir. Farklı olarak MNG Kargo'nun kendi uçak filosu bulunmaktadır.

Tüm şirketlerde araçlar şirkete aittir. Bu araçlar şubelerin kullanımına atanmıştır. Her şubenin kendine ait araçları vardır. Araç yetmeme durumunda anlaşmalı şirketlerden araç kiralanmaktadır.

Tüm şirketler kargonun büyük bir kısmını kara yolu ile taşımaktadır. Dosya ve bazı paket gönderilerini daha hızlı bir şekilde taşıyabilmek için tüm şirketlerin THY ile anlaşması vardır. Kara yolu ve hava yolu dışında bir tek Yurtiçi Kargo Kıbrıs gönderileri için deniz yolunu kullanmaktadır. Demir yolu taşımacılığı ise hiç kullanılmamaktadır.

EK 1'de Aras Kargo, Yurtiçi Kargo ve MNG Kargo şirketinin dosya taşımacılığında standart ve VIP servis hizmeti için bazı il ikilileri arasındaki servis süreleri ve Mayıs 2013 itibari ile ücret bilgileri (TL/dosya) verilmektedir. İl ikilileri Türkiye coğrafyasını kaplayacak şekilde seçilmeye çalışılmıştır. İl ikilileri aralarındaki mesafeye göre artan sırada verilmiştir. Ücretlere bakıldığında standart servis hizmeti için en ucuz taşımayı Yurtiçi Kargo'nun, en pahalı taşımayı ise Aras Kargo'nun yaptığı görülmektedir. VIP servis hizmeti için en ucuz hizmeti Aras Kargo sağlamaktadır. Bunun sebebi VIP servis süresinin diğer şirketlere göre daha uzun olmasıdır. Ayrıca her il ikilisi arasında karşılıklı VIP servis hizmeti verilememektedir. Koyu renk ile belirtilen il ikilileri karşılıklı VIP servis hizmetinin verilmediği il ikililerini ifade etmektedir. Örneğin Ankara'dan Erzurum'a Yurtiçi Kargo ve MNG Kargo şirketlerinde VIP hizmeti sağlanamazken, Erzurum'dan Ankara'ya VIP hizmeti sağlanabilmektedir. Üç kargo şirketi de mesafelere göre ücret stratejisi belirlemektedir. Üç şirket de 0-200 km, 200-600 km, 600-1000 km ve 1000 km'den fazla mesafeye sahip il ikilileri için dört farklı fiyat stratejisi uygulamaktadır.

3 LİTERATÜR TARAMASI

Ana dağıtım üsleri (ADÜ) dağıtım sistemlerinde aktarma, ayırma, birleştirme ve sıralama gibi işlemleri gerçekleştirmektedir. Akış ADÜ'lerde toplanıp birleştirilerek gönderilmekte, böylelikle ölçek ekonomilerinden yararlanılmaktadır.

ADÜ yer seçimi problemleri, ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi ve talep noktalarının ADÜ'lere atanması problemlerini içermektedir. ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemlerinde ise ADÜ'lerin yerleri ve talep noktalarının hangi ADÜ'lere atanacağı kararlarının yanı sıra, hangi ADÜ'ler arasında direkt bağlantıların kurulacağına ve ADÜ'ler arasındaki akışların hangi rotalardan gideceğine de karar verilmektedir. Birden çok ulaşım yolu içeren intermodal ağlarda ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı kararlarının verildiği çalışmalar da literatürde mevcuttur. Bunların yanı sıra literatürde ADÜ yer seçimi kararları içermeyen ancak servis süreleri ile birlikte ağ tasarımı ele alan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu bölümdeki literatür taraması, ADÜ yer seçimi, ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı, intermodal ağlarda ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı, servis ağı tasarımı ve bu problemler için geliştirilmiş olan sezgisel algoritmaların ele alındığı bölüm olmak üzere beş ayrı başlık altında incelenmektedir.

3.1 ADÜ Yer Seçimi

ADÜ yer seçimi problemlerinde talep noktalarının ADÜ'lere atanabilmesi için tekli atama ve çoklu atama olmak üzere iki farklı atama tipi kullanılmaktadır [1]. Tekli atamada her bir talep noktasının tam olarak tek bir ADÜ'ye atanmasına izin verilmektedir. Bu tip atamada, talep noktasından gönderilecek ve talep noktasına gelecek olan tüm akış talep noktasının bağlı bulunduğu ADÜ üzerinden gerçekleştirilmektedir. Çoklu atamada ise talep noktalarının birden fazla ADÜ'ye atanmasına izin verilmektedir.

Literatürdeki ADÜ yer seçimi problemlerinde sıklıkla aşağıdaki üç varsayım yapılmaktadır [1]:

- Tam serim bir ADÜ ağı kurulması (her iki ADÜ arasında direkt bağlantı olması),
- ADÜ ağındaki akışlarda ölçek ekonomilerinden faydalanılması,
- İki talep noktası arasında ADÜ'ye uğramayan direkt bir bağlantı olmaması.

ADÜ yer seçimi problemlerinde atama bağlantılarındaki akış ADÜ'lerde birleştirilerek taşındığından ADÜ'ler arasındaki bağlantılarda birim akışı taşıma maliyeti atama bağlantılarındakinden daha düşük olmaktadır. Ölçek ekonomisinden kaynaklanan maliyetteki bu düşüş $0 \leq \alpha < 1$ olacak şekilde ADÜ'ler arasındaki birim maliyetin α ile çarpılması ile literatürdeki modellere yansıtılmaktadır.

ADÜ yer seçimi problemi üzerine olan ilk matematiksel model O'Kelly [2] tarafından önerilmektedir. Bu makalede önerilen model tek atamalı *p-ADÜ ortanca* problemi olarak adlandırılmıştır. Problemden n adet talep noktasının yerleri ve bu talep noktaları arasındaki akış miktarları verilmekte, verilen bu n noktadan p tanesi ADÜ olarak belirlenmektedir. Amaç toplam ulaşım maliyetlerinin en küçüklenmesidir. *p-ADÜ ortanca* problemi için önerilen ilk doğrusal model Campbell [3] çalışmasında sunulmaktadır. Bu çalışmada hem tekli atama hem de çoklu atama *p-ADÜ ortanca* problemleri için $O(n^4)$ mertebesinde karar değişkenleri ve kısıtları olan matematiksel modeller önerilmektedir.

p-ADÜ ortanca problemlerinde açılacak olan tesis sayısı p olarak sabit olduğundan tesis açmanın sabit maliyetleri göz ardı edilmektedir. O'Kelly [4] çalışmasında açılacak olan tesis sayısının da bir karar değişkeni olduğu ve toplam maliyeti en küçükleyen *sabit maliyetli ADÜ yer seçimi* modeli önerilmektedir. Bu problem üzerine kurulan ilk doğrusal matematiksel modeller Campbell [3] tarafından sunulmaktadır. Bu problemde, yerleştirilecek ADÜ sayısı sabit olmadığından kurulacak ADÜ tesislerinin kapasitelerinin de göz önüne alınması mümkündür. Bu

nedenle sabit maliyetli yer seçimi problemleri kapasiteli ve kapasitesiz olarak ayrı ayrı incelenmektedir.

Hem p -ADÜ ortanca hem de sabit maliyetli ADÜ yer seçimi problemleri toplam maliyetin en küçüklenmesini hedeflemektedir. Ancak bazı durumlarda en yüksek maliyetin veya en uzun sürede servis alan talep noktalarının düşünülmesi gerekebilir. Bu durumun göz önüne alınması sonucu Campbell [3] iki yeni ADÜ yer seçimi problemi tanımlamaktadır. Bu iki problem de özellikle servis zamanlarının önemli olduğu uygulamalar için önerilmektedir. Bu problemlerden ilki olan p -ADÜ merkez probleminde en büyük maliyetle veya en uzun sürede servis alan iki talep noktası arasındaki maliyetin veya servis süresinin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Campbell [3] tarafından önerilen bir diğer problem de ADÜ kaplama problemidir. Bu problemde açılacak olan ADÜ tesislerinin toplam maliyeti en küçüklenirken her iki talep noktasının belirli bir servis süresi limiti içerisinde servis alması hedeflenmektedir.

Yukarıda tanımlanmış olan p -ADÜ ortanca, sabit maliyetli ADÜ yer seçimi, p -ADÜ merkez ve ADÜ kaplama problemlerinin genel halleri NP-zor olarak sınıflandırılmaktadır [1].

ADÜ yer seçimi problemleri ile ilgili olarak literatürde kabul görmüş üç farklı kıyaslama verisi bulunmaktadır. Bunlardan ilki olan ve O’Kelly [2] çalışmasında sunulan CAB veri kümesi ABD’deki 25 şehir arasındaki hava yolu yolcu taşımacılığı bilgilerini içermektedir. AP veri kümesi ise Sidney’deki Avustralya Postası verilerinden oluşmaktadır. Bu veri kümesi ilk kez Ernst ve Krishnamoorthy [5] çalışmasında kullanılmaktadır. Üçüncü olarak, Tan ve Kara [6] tarafından literatüre kazandırılan Türkiye veri kümesi bulunmaktadır. Bu üç veri kümesine de OR Kütüphanesi’nden ulaşılabilir [7].

Yayın taraması makaleleri olan Campbell vd. [8], Alumur ve Kara [1], Farahani vd. [9] çalışmalarında ADÜ yer seçimi problemi üzerine yapılmış olan birçok çalışmadan bahsedilmektedir. Bu tez kapsamında ele alınan problemde ADÜ yer

seçimi kararlarının yanı sıra ADÜ ağı tasarımı kararları da ele alınmaktadır. Dolayısı ile bir sonraki kısımda ADÜ ağı tasarımı kararlarını içeren ADÜ yer seçimi çalışmaları ayrıntılı olarak incelenmektedir.

3.2 ADÜ Yer Seçimi ve ADÜ Ağı Tasarımı

Literatürde ele alınan birçok ADÜ yer seçimi probleminde ADÜ ağlarının tam serim olması varsayımı geçerlidir. Yani tüm ADÜ'ler arasında direkt bağlantı bulunmaktadır. Ancak bu varsayım gerçek hayattaki birçok ADÜ ağı için geçerli değildir. Kargo şirketleri ile yapılan gerçek hayat gözlemlerinde görüldüğü gibi araçlar bir ADÜ'den diğerine giderken başka bir ADÜ'ye uğrayıp yükünü boşaltabilmekte veya yük alarak yoluna devam edebilmektedir. Bu şekilde servis seviyesi korunarak daha düşük maliyetli taşıma sağlanabilmektedir.

Literatürde ADÜ ağlarının tam serim olması varsayımını gevşeten, ADÜ yer seçimi kararları ile birlikte ADÜ ağı tasarımı kararlarını da veren birçok çalışma bulunmaktadır. Nickel vd. [10] çalışmasında şehir içi toplu taşıma ağları için $O(n^4)$ mertebesinde karar değişkenleri olan çoklu atamalı bir matematiksel model sunulmaktadır. Model ADÜ açma maliyetlerine ek olarak ADÜ'ler arası bağlantılar için sabit maliyetler içermektedir. Amaç toplam maliyeti en küçüktür. Makalede verilen başka bir modelde ise araçların uğrayabileceği ADÜ sayısına kısıt getirilmektedir. Yoon ve Current [11] tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise ADÜ açma maliyeti, ADÜ bağlantısı açma maliyeti ve bağlantılar üzerinde taşınan talebe ait değişken maliyet olmak üzere üç farklı maliyet kalemi ilk kez birlikte düşünülmektedir.

Alumur ve Kara [13] kargo taşımacılığında tam serim olmayan tekli atama ADÜ kaplama problemi için $O(n^3)$ mertebesinde karar değişkenleri olan bir matematiksel model sunmaktadır. Model belirli bir servis seviyesi için toplam ADÜ açma maliyetini ve ADÜ'ler arasında bağlantı kurma maliyetini en küçükmeyi amaçlamaktadır. Kargoların yükleme boşaltma sırasında zarar görmesini engellemek

amacıyla araçların başlangıç-varış noktaları arasında en fazla üç ADÜ'ye uğrayabilmelerine izin verilmektedir. Calık vd. [14] ise yine tam serim olmayan tekli atama ADÜ kaplama problemi için $O(n^4)$ mertebesinde karar değişkenleri olan bir matematiksel model ve bu modelin çözümü için bir sezgisel algoritma sunmaktadır. Modelde bir önceki çalışmadan farklı olarak başlangıç-varış noktaları arasında araçların uğrayabileceği ADÜ sayısı için herhangi bir kısıtlama getirilmemektedir. Modelin çözümü için tabu arama sezgisel algoritması kullanılmaktadır.

Alumur vd. [12] tekli atamalı p -ADÜ ortanca, sabit maliyetli ADÜ yer seçimi, p -ADÜ merkez ve ADÜ kaplama problemi olmak üzere başlıca dört ADÜ yer seçimi problemi için tam serim olmayan, ADÜ yer seçiminin yanında ADÜ ağı tasarımı kararlarını da içeren $O(n^3)$ mertebesinde karar değişkenleri olan matematiksel modeller önermektedir.

Campbell vd. [15, 16] ADÜ yerlerinin ayrıt seçimi ile belirlendiği problemler sunmaktadır. Birim akışın daha düşük maliyet ile taşındığı ADÜ'ler arasındaki bu ayrıtların seçimi ile iki ADÜ arasındaki akışın herhangi bir talep noktası ile ADÜ arasındaki akıştan daha az olması durumu engellenmeye çalışılmaktadır. Dört genel ADÜ yer seçimi problemi için ADÜ ayrıt yeri seçiminin sonuçları analiz edilmekte ve klasik ADÜ yer seçimi problemlerinden farkları ortaya koyulmaktadır. Campbell [17] ise çoklu atamalı p -ADÜ ortanca ve ADÜ ayrıt yer seçimi problemine servis süresi kısıtları ekleyerek yeni bir problem tanımlamaktadır. Bu çalışmada belirli bir servis süresini sağlayan tüm ikililerin bulunduğu bir küme oluşturulduktan sonra sadece bu küme için p -ADÜ ortanca ve ADÜ ayrıt yer seçimi problemleri çözülmektedir.

Contreras vd. [18, 19] belirli sayıda ADÜ'nün yerleştirildiği tekli atamalı ADÜ yer seçimi ve ağaç ağı şeklinde ADÜ ağı tasarımı problemlerini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, ADÜ'ler arasında bağlantı maliyetinin çok yüksek olduğu durumlarda tam serim yerine ağaç ağı şeklinde bir ADÜ ağı tasarlanmasının daha etkin olduğu düşünülmektedir.

Özel ADÜ ağı yapıları tasarımı üzerine başka çalışmalar da mevcuttur. Labbe ve Yaman [20] yıldız şeklinde bir ADÜ ağı tasarlamaktadır. Bu ağda ADÜ ve merkezi ADÜ olmak üzere iki çeşit ADÜ bulunmaktadır. Merkezi ADÜ'lerin oluşturduğu ağ tam serim olmayan ADÜ ağı yapısındadır. Diğer ADÜ'ler ise tekli atama şeklinde merkezi ADÜ'lere bağlıdır. Her bir talep noktası ise yine yalnız bir ADÜ'ye atanmaktadır. Yaman [21] ise üç seviyeli hiyerarşik ADÜ ağı tasarımı gerçekleştirmektedir. Birinci seviye merkezi ADÜ'lerden oluşmaktadır ve tam serim ağ yapısına sahiptir. İkinci ve üçüncü seviyeler ise yıldız şeklinde bir ağ oluşturmaktadır. İkinci seviyede ADÜ'ler merkezi ADÜ'lere, üçüncü seviyede ise talep noktaları ADÜ ve merkezi ADÜ'lere bağlanmaktadır.

Ishfaq [22] tam serim bir ADÜ ağı için çoklu ve tekli atamalı sabit maliyetli ADÜ yer seçimi problemine dayalı farklı servis seviyeleri içeren, yer seçimi ve atama kararları veren bir problem sunmaktadır. Amaç üç farklı servis seviyesi için kârlılığı en büyükmektir. Diğer çalışmalardan farklı olarak iki talep noktası arasında direkt bağlantı kurulmasına izin verilmektedir. Problemin çözümü için bir sezgisel algoritma sunulmaktadır.

Jailet vd. [23] tarafından gerçekleştirilen çalışmada herhangi bir özel ADÜ ağı yapısı varsaymadan yer seçimi, kapasiteli ağ tasarımı ve rotalama kararları için akış temelli modeller geliştirilmektedir. Üç farklı servis seviyesine göre modeller oluşturulmaktadır. Birincisi direk uçuşları ve bir ADÜ'ye uğrayan uçuşları, ikincisi iki ADÜ'ye uğrayanları ve üçüncüsü de uğranacak ADÜ sayısına bir kısıt getirmeyen uçuşları içermektedir. Çözüm için sezgisel algoritmalar önerilmektedir. Çalışmanın önemli özelliklerinden biri ölçek ekonomisinin modelin bir girdisi değil çıktısı olması ve şehir çiftleri arasında değişebilmesidir.

3.3 Intermodal Ağlarda ADÜ Yer Seçimi ve ADÜ Ağları Tasarımı

Yukarıdaki bölümlerde bahsedilen çalışmalarda farklı ulaşım yollarının kullanılmasına izin verilmemektedir. Bu bölümde farklı ulaşım yollarının bulunduğu intermodal ağlarda ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı kararları ile ilgilenen çalışmalardan bahsedilmektedir.

Arnold vd. [24] yük taşımacılığı kapsamında demir yolu ve kara yolu terminallerinin yerlerinin belirlenmesi için bir tamsayılı programlama modeli önermektedir. Groothedde vd. [25] hızlı tüketim malları için birden fazla ulaşım yolu ve farklı tip maliyet kalemleri içeren ADÜ ağı tasarımı problemini çalışmaktadır. Problemden ADÜ yer seçimi problemlerinde bahsedilen üç varsayım da gevşetilmektedir. Elleçleme, yükleme, boşaltma, sipariş verme, envanter maliyetleri gibi farklı maliyetler düşünülmektedir. Limbourg ve Jourquin [26] demiryolu ve karayolu konteyner terminallerinin yerlerinin belirlenmesi için p -ADÜ ortanca probleminden yararlanmaktadır.

Bunların yanı sıra servis sürelerini içeren çalışmalar da bulunmaktadır. Ishfaq ve Sox [27] farklı ulaşım yolları için taşıma yolu değiştirme maliyeti ve servis süresi kısıtları içeren p -ADÜ ortanca problemini çalışmaktadır. Ölçek ekonomisini modele yansıtılmak için taşınacak olan akışın miktarına bağlı olarak değişen parçalı doğrusal maliyet fonksiyonları kullanılmaktadır. Talep noktaları arasında direkt ulaşım izin verilmektedir. Çözüm için bir tabu arama meta-sezgisel algoritması önerilmektedir. Ishfaq ve Sox [28] bir başka çalışmada ise demir yolu ve kara yolu içeren bir intermodal ağda kapasitesiz çoklu atama p -ADÜ ortanca problemi üzerinde çalışmaktadır. Çözüm için tabu arama algoritması kullanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda ADÜ ağlarının tam serim olduğu varsayılmakta bu nedenle de ADÜ ağı tasarımı kararları verilmemektedir. ADÜ yer seçimi kararları ile birlikte intermodal ağlarda ADÜ ağı tasarımı kararlarını içeren çalışmalar da

bulunmaktadır. Alumur vd. [29] farklı tip servis seviyelerinin ve ulaşım yollarının bulunduğu ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemi için hem ulaşım zamanlarını hem de ulaşım maliyetlerini aynı anda düşünen karma tamsayı bir matematiksel model sunmaktadır. Bu çalışmada, aynı ikili arasında tek tip servis verilmekte ve tek tip ulaşım yolu kullanılmaktadır. Amaç belirlenen servis seviyeleri için toplam ADÜ açma, ADÜ bağlantısı kurma ve ulaşım maliyetlerini en küçükmektir. Modelin çözümü için bir sezgisel algoritma sunulmakta, iki tip servis seviyesi ve iki tip ulaşım yolu içeren ADÜ ağı için modelin verdiği kesin çözüm ile karşılaştırılmaktadır. Alumur vd. [30] çalışmasında ise iki ulaşım yolu içeren hiyerarşik bir ADÜ ağında yer seçimi kararları ele alınmaktadır. Çalışmada hava yolu, merkez hava yolu ve kara yolu olmak üzere üç çeşit ADÜ bulunmaktadır. Her bir kara yolu ADÜ'sü bir hava yolu ADÜ'süne veya merkez hava yolu ADÜ'süne, her bir hava yolu ADÜ'sü ise merkez hava yolu ADÜ'süne bağlı olmak durumundadır. Talep noktaları ADÜ tiplerinden sadece bir tanesine bağlı olabilmektedir. Hava yolu ADÜ'leri merkez hava yolu ADÜ'süne bağlı yıldız şeklinde bir ağ oluşturmaktadır. İki kara yolu ADÜ'sü aynı hava yolu ADÜ'süne bağlı ise, bu iki kara yolu ADÜ'sü arasında direkt bağlantı kurulabilmektedir. ADÜ ağı tasarımı kararları bu noktada ortaya çıkmaktadır. Ayrıca ADÜ yerleri seçilirken talep noktalarının belirli bir servis seviyesi için hizmet alması gerekmektedir.

3.4 Servis Ağı Tasarımı

Tez kapsamında ele alınan problemde ADÜ yer seçimi kararları bulunmaktadır. Servis ağı tasarımı probleminde ADÜ yer seçimi kararları ile ilgilenilirse de, bu konuda yapılmış olan çalışmalar da incelenmiştir. Crainic [31] yayın taraması çalışmasında 1998 yılına kadar yapılmış olan modelleme çalışmalarını özetlenmiş ve problem için yeni bir sınıflandırma ve formülasyon önerilmiştir. Bir kitap bölümü olan Crainic ve Kim [32] çalışmasında intermodal taşımacılık, yük taşımacılığı, servis ağları tasarımı, filo yönetimi ayrıntılı olarak incelenmekte ve ilgili modeller sunulmaktadır. Kim vd. [33] ise hızlı paket teslimi için servis ağı tasarımı problemini çalışmaktadır. Sıkı servis süreleri için limitli ayrıştırma kapasitesi olan, limitli sayıda

kara yolu ve hava yolu filosu içeren bu problemde amaç maliyeti en küçükmektir. Bir diğey yayın taraması makalesi olan Crainic ve Laporte [34] çalışmasında demir yolu ve bir kamyon yükünden az yük taşımacılığı üzerine olan çalışmalar ele alınmaktadır.

Servis ağı tasarımı problemlerinde ADÜ yer seçimi kararları ele alınmamaktadır. Ancak, bu konuda yapılan çalışmalar farklı ulaşım yollarında farklı kapasite araçlar kullanılan ağların tasarımı ile ilgilendiğı için bu tezde ele alınan problem ile ilgilidir.

3.5 ADÜ Yer Seçimi Problemleri İçin Önerilen Sezgisel Algoritmalar

Ele alınan problemin çözümü için bir sezgisel algoritma geliştirilmiş olduğundan, bu bölümde, daha önce benzer problemler için geliştirilmiş olan sezgisel algoritmalar incelenmektedir.

ADÜ yer seçimi problemleri NP-zor problemlerdir. Tekli atama kuralında ADÜ yerleri belirlenmiş olduğunda bile problemin atama kısmı NP-Zor sınıftadır. Bu nedenle problemlerin çözümü için literatürde birçok sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ancak literatürde geliştirilen algoritmaların hiçbiri ağ tasarımı ve bu ağda hizmet verecek araçların belirlenmesi kararlarını içermemektedir. Tablo 3.1’de ADÜ yer seçimi problemleri için geliştirilmiş olan sezgisel algoritmalara ait yıl, yazar ve problem bilgileri verilmektedir.

p -ADÜ ortanca problemi için geliştirilmiş olan ilk sezgiseller O’Kelly [2] tarafından sunulmaktadır. Bu çalışmada sunulan her iki algoritma da p adet ADÜ yeri için tüm olasılıkları hesaplamaktadır. Birinci algoritmada talep noktaları kendisine en yakın ADÜ’ye ikincisinde ise en yakın ya da ikinci en yakın ADÜ’den daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan ADÜ’ye atanmaktadır. Algoritmaların çözümü için CAB veri kümesi kullanılmaktadır. Klincewicz [35, 36] p -ADÜ ortanca problemi için çeşitli algoritmalar önermektedir. Klincewicz [35] geliştirdiğı yer değiştirme

tabanlı sezgisel algoritma ile O’Kelly tarafından önerilen algoritmaya kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Klincewicz [36] bir diğer çalışmada ise tabu arama ve açgözlü rastgele adaptif arama (GRASP) tabanlı sezgisel algoritmalar önermektedir. Her iki algoritmada da talep noktaları kendilerine en yakın ADÜ’lere atanmaktadır.

Tablo 3.1: ADÜ yer seçimi problemi için geliştirilmiş olan sezgisel algoritmalar.

| Yıl | Yazarlar | Problem | Geliştirilen Algoritma |
|------|----------------------------------|---|--|
| 1987 | O’Kelly | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Açgözlü algoritma |
| 1991 | Klincewicz | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Yer değiştirme algoritması |
| 1992 | Klincewicz | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Tabu arama algoritması |
| 1994 | Skorin-Kapov ve Skorin-Kapov | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Tabu arama algoritması |
| 1996 | Ernst ve Krishnamoorthy | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Tavlama benzetimi algoritması |
| 1998 | Abdinnour-Helm ve Venkatavamanan | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Genetik algoritma |
| 1998 | Abdinnour-Helm | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Hibrit sezgisel algoritma |
| 1999 | Ernst ve Krishnamoorthy | Kapasiteli tekli atama ADÜ yer seçimi | Tavlama benzetimi algoritması |
| 2001 | Pamuk ve Sepil | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ merkez | Tabu arama algoritması |
| 2001 | Abdinnour-Helm | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Tavlama benzetimi algoritması |
| 2005 | Topcuoglu vd. | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Genetik algoritma |
| 2007 | Cunha ve Silva | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Hibrit genetik algoritma |
| 2007 | Chen | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Hibrit sezgisel algoritma |
| 2007 | Kratica vd. | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Genetik algoritma |
| 2009 | Calik vd. | Kapasitesiz tekli atama ADÜ kaplama | Tabu arama algoritması |
| 2009 | Silva ve Cunha | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Tabu arama algoritması |
| 2010 | Ishfaq ve Sox | İntermodal ağda kapasitesiz tekli atama servis süresi kısıtları içeren p -ADÜ ortanca | Tabu arama algoritması |
| 2010 | Ilic vd. | Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca | Yerel arama algoritması |
| 2011 | Ishfaq ve Sox | İntermodal ağda kapasitesiz çoklu atama servis süresi kısıtları içeren p -ADÜ ortanca | Tabu arama algoritması |
| 2012 | Lin vd. | Kapasiteli tekli atama p -ADÜ ortanca | Genetik algoritma |
| 2013 | Gomes vd. | Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi | Genetik algoritma ve yerel arama algoritması |

Aynı problem için bir başka tabu arama sezgiseli Skorin-Kapov ve Skorin-Kapov [37] tarafından önerilmektedir. Bu çalışmada çözümler için gerekli CPU zamanı daha fazla olsa da O’Kelly [2] ve Klincewicz [36] çalışmalarına kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ernst ve Krishnamoorthy [5] tarafından geliştirilen tavlama benzetimi sezgisel algoritması performans açısından Skorin-Kapov ve Skorin-Kapov [37] ile benzer sonuçlar vermektedir.

Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi problemi için Abdinnour-Helm ve Venkataramann [38] genetik algoritma, Abdinnour-Helm [39] ise genetik algoritma ve tabu arama tabanlı hibrit sezgisel algoritma sunmaktadır. CAB verisi kullanılarak elde edilen sonuçlarda hibrit sezgisel algoritma genetik algoritmaya kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Ernst ve Krishnamoorthy [40] tarafından aynı problem için bir tavlama benzetimi diğeri rastgele azalma algoritması olmak üzere iki algoritma önerilmektedir. CAB veri kümesi kapasite ve sabit maliyet değerlerini içermediğinden algoritmalar AP veri kümesi ile test edilmektedir.

Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ merkez problemi için ilk sezgisel algoritma Pamuk ve Sepil [41] tarafından önerilmektedir. Algoritmanın temeli her bir adımda sadece bir değişimin yapıldığı yeniden yer seçimine dayanmaktadır. Yerel optimale takılma ihtimalinin önüne geçebilmek için geliştirilmiş olan sezgisel algoritma tabu arama ile birleştirilmiştir.

Abdinnour-Helm [42] p -ADÜ ortanca problemi için daha önce Ernst ve Krishnamoorthy [5] tarafından da önerilmiş olan tavlama benzetimi tabanlı bir sezgisel algoritma sunmaktadır. Ancak önerilen bu sezgisel algoritma ile daha önce Ernst ve Krishnamoorthy tarafından elde edilmiş olan sonuçlar iyileştirilememiştir.

Topcuoglu vd. [43] kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi problemi için bir başka genetik algoritma önermektedir. Bu algoritma CAB ve AP veri kümelerinde hem çözüm kalitesi hem de çözüm süresi açısından Abdinnour-Helm [39] tarafından geliştirilen algoritmadan daha iyi sonuçlar vermiştir. Cunha ve Silva [44] tarafından aynı problem için genetik algoritma ve tavlama benzetimi tabanlı bir sezgisel

algoritma sunulmaktadır. Bu hibrit sezgisel algoritma hem Abdinnour-Helm ve Venkataramanan [38] hem de Abdinnour-Helm [39] çalışmalarında geliştirilen genetik algoritmalarından daha iyi sonuçlar vermektedir. Aynı problem için tavlama benzetimi, tabu arama ve iyileştirme adımları içeren bir sezgisel algoritma Chen [45] tarafından geliştirilmiş ve hem çözüm kalitesi hem de çözüm süresi açısından Topcuoglu vd. [43] tarafından elde edilen sonuçlardan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca probleminin çözümü için Kratica vd. [46] tarafından iki adet genetik algoritma sunulmaktadır. Bu algoritmalarından ikincisi ile literatürde daha önce elde edilmiş olan en iyi çözümlere ya da optimal çözümlere ulaşılmıştır.

Kapasitesiz tekli atama ADÜ kaplama problemi için ilk sezgisel algoritma Calik vd [14] tarafından sunulmaktadır. Çalışmada atama kararları için üç farklı strateji önerilmektedir. Algoritmanın çözümü için hem CAB hem de Türkiye veri kümesi kullanılmaktadır. 81 talep noktası içeren Türkiye veri kümesi tam serim olmayan ADÜ ağlarının tasarımı için literatürde daha önce kullanılmış olan en büyük veri kümesidir.

Silva ve Cunha [47] tarafından kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi problemi için birçok başlangıç çözümlü sezgisel algoritma ve tabu arama algoritması olmak üzere iki adet çözüm yöntemi önerilmektedir. Öncelikle çok başlangıç çözümlü sezgisel algoritma ile birçok başlangıç çözümü üretilmekte daha sonra tabu arama ile üretilen çözümler iyileştirilmektedir. İki aşamalı tabu arama algoritmasıyla ise problemin hem yer seçimi hem de atama kısmı iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Algoritmalar CAB ve AP veri kümeleri üzerinde test edilmekte ve elde edilen sonuçlarla literatürdeki bilinen en iyi sonuçlara ya da optimal çözümlere ulaşılmaktadır.

Ishfaq ve Sox [27] intermodal ağda kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca problemi için tabu arama algoritması sunmaktadır. Ele alınan problemde talep noktaları arasında direkt bağlantı kurulmasına izin verilmektedir. CAB veri kümesi ile yapılan

analizler sonucunda intermodal ağların maliyet ve servis gereksinimleri açısından tek bir ulaşım yolunu kullanan ağlara göre daha hassas olduğu vurgulanmaktadır. Ishfaq ve Sox [28] çalışmasında ise intermodal ağda kapasitesiz çoklu atama p -ADÜ ortanca problemi için tabu arama tabanlı bir sezgisel algoritma önerilmektedir. Algoritma CAB veri kümesi üzerinde test edilmekte ve Lagranj gevşetmesi ile elde edilen alt sınırlar ile sezgisel algoritma karşılaştırılmaktadır.

Iliv vd. [48] tarafından kapasitesiz tekli atama p -ADÜ ortanca problemi için üç farklı komşuluk yapısı içeren bir yerel arama algoritması önerilmektedir. AP veri kümesi ile yapılan analizlerle literatürde daha önce elde edilmiş olan optimal sonuçlara ulaşılmış ve bazı örneklerde de bilinen en iyi sonuçlar iyileştirilmiştir.

Lin vd. [49] çalışmasında kapasiteli tekli atama p -ADÜ ortanca probleminin Çin hava yolu kargo verisi ile çözümü için genetik algoritma tabanlı bir sezgisel algoritma önerilmektedir.

Kapasitesiz tekli atama ADÜ yer seçimi problemi için Gomes vd. [50] tarafından geliştirilmiş olan genetik algoritma tabanlı yerel arama algoritması hem CAB hem de AP veri kümeleri ile yapılan analizlerde literatürde kendisinden önce yapılmış olan çalışmalardan daha iyi sonuçlar vermektedir. Çalışmada iyi sonuçlar veren beş farklı komşuluk üretme tekniği önerilmektedir. Bu komşuluk üretme teknikleri genetik algoritmanın çaprazlama ve mutasyon adımları olarak ele alınmakta, sonrasında da üretilen çözümlere bir yerel arama algoritması uygulanmaktadır.

Görüldüğü gibi geliştirilmiş olan algoritmaların hiç birinde ADÜ yer seçimi, ADÜ ağ tasarımı ve bu ağda hizmet verecek araçların belirlenmesi kararları birlikte ele alınmamıştır. Ayrıca, bu tez çalışmasında birden fazla ulaşım yolunun kullanılması ve ADÜ kapasitelerinin olması da geliştirilecek olan algoritmanın yapısını değiştirmektedir.

3.6 Sentez

Literatürde ADÜ yer seçimi problemi üzerine olan ilk çalışmalar p -ADÜ ortanca, sabit maliyetli ADÜ yer seçimi, p -ADÜ merkez ve ADÜ kaplama problemleri ile ilgilendirilmiştir [1]. Tam serim ADÜ ağı varsayımının gerçekçi bir yaklaşım olmadığı fark edilmesi ile ADÜ yer seçimi problemlerine ADÜ ağı tasarımı kararları da eklenmiştir [10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21].

Günümüzde birçok dağıtım ağının tek ulaşım yolundan çok yollu ulaşımına geçmesi sebebi ile yakın tarihli birkaç çalışmada intermodal ağlarda ADÜ yer seçimi kararları incelenmiştir [24, 26, 28], ancak bu çalışmalara ADÜ ağı tasarımı kararları eklenmemiştir.

Bu tez çalışmasında ele alınan probleme en çok benzeyen çalışmalar ADÜ yer seçimi ve intermodal ADÜ ağları tasarımı konuları üzerine yapılan çalışmalardır [29, 30]. Ancak bu çalışmaların hiçbirinde ADÜ'ler arasında farklı tip ulaşım yoluna sahip birden çok bağlantıya ya da farklı kapasitede araçlar kullanılmasına izin verilmemektedir. Ayrıca, ADÜ yer seçimi probleminin ADÜ ağı tasarımı problemi ile beraber ele alındığı çalışmalarda bağlantılar üzerindeki kapasite kısıtları literatürde daha önce ele alınmamıştır.

4 PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde öncelikle tez kapsamında üzerinde çalışılan problem tanımlanmakta, daha sonra ise bu problem için bir karma tamsayılı programlama modeli önerilmektedir.

4.1 Problem Tanımı

Bu tez kapsamında, talep noktaları arasındaki talebin karşılanması için ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi ve ADÜ ağının tasarımı problemi çalışılmaktadır. Bu kapsamda daha önce de bahsedildiği gibi, küçük paket ve dosya taşımacılığı uygulamaları ele alınmaktadır. Bu uygulamalarda, tasarlanacak ADÜ ağında hangi ulaşım yollarının ve hangi tip araçların kullanılacağına karar verilmesi gerekmektedir.

Ele alınan problemde karar verilecekler; ADÜ'lerin yerleri ve kapasiteleri, talep noktalarının hangi ADÜ'lere atanacağı, ADÜ'ler arasında hangi ulaşım tipinden, hangi tip ve kaç adet aracın hizmet vereceği olacaktır. Bu kararlar verilirken amaç maliyetin en küçüklenmesidir.

Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi ADÜ'ler arasında farklı ulaşım yollarının ve bu ulaşım yollarında hizmet veren farklı kapasitede araçların olduğu ADÜ yer seçimi ve intermodal ADÜ ağları tasarımı problemi literatürde daha önce ele alınmamıştır.

Yapılan gerçek hayat gözlemleri sırasında ADÜ ağının tasarlanması ve işletilmesi kapsamında ne gibi maliyetlerin olduğu tespit edilmiştir. ADÜ açma maliyetleri, ulaşım maliyetleri, araç işletme maliyetleri, araç kiralama maliyetleri ve elleçleme maliyetleri problem kapsamında ele alınan maliyet kalemleridir. ADÜ açma maliyeti; arsa ve inşaa maliyetlerini içermektedir ve açılacak olan ADÜ kapasitesine

göre değişmektedir. Ulaşım maliyetleri araçların yakıt maliyeti ve diğer operasyonel maliyetlerinden oluşmaktadır. Araç işletme maliyetleri şoför ve bakım maliyetlerini, araç kiralama maliyetleri ise kiralanan araçların ulaşım maliyetlerini içermektedir.

Problem kapsamında yapılmış olan varsayımlar aşağıdaki gibidir;

- Her talep noktası tek bir ADÜ'ye bağlıdır.
- Talep noktaları ile ADÜ'ler arasında kara yolu ve tek tip araç kullanılmaktadır.
- Talep noktaları arasında ADÜ'ye uğramayan direkt bir bağlantı yoktur.
- Her bir araç tek bir bağlantı üzerinde hizmet vermektedir.

Tezin ikinci bölümündeki gerçek hayat gözlemlerinde de anlatıldığı gibi yapılmış olan tüm varsayımlar Türkiye'de hizmet veren üç büyük kargo firmasında gerçekleştirilen gözlemler ışığında yapılmıştır. Dolayısıyla hepsi gerçekçi varsayımlardır.

4.2 Matematiksel Model

Bir önceki bölümde tanımlanan problem için bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Model için gerekli kümeler, parametreler ve karar değişkenlerinin tanımları aşağıda sunulmaktadır.

Kümeler

- N : Talep noktaları kümesi
 H : Potansiyel ADÜ yerleri kümesi
 Q : ADÜ kapasiteleri kümesi
 M : Ulaşım yolları kümesi
 V : ADÜ'ler arasında hizmet verebilecek olan araç tiplerinin kümesi
 V_m : : $m \in M$ ulaşım yolunu kullanabilen araç tipleri kümesi ($V_m \in V$)

Parametreler

- w_{ij} : $i \in N$ noktasından $j \in N$ noktasına taşınacak olan akışın miktarı
- c_{ij}^v : $i \in N$ noktasından $j \in N$ noktasına $v \in V$ tipi araç ile gitmenin birim maliyeti
- fc_j : $j \in H$ noktasına ADÜ açma maliyeti
- kc_j^{mq} : $j \in H$ noktasında kurulacak olan ADÜ'de $m \in M$ ulaşım yoluna hizmet verebilen $q \in Q$ kapasitesi açma maliyeti
- k^{vq} : $q \in Q$ kapasitedeki bir ADÜ'nün elleçleyebileceği maksimum $v \in V$ tipi araç sayısı
- u^v : $v \in V$ tipi aracın taşıma kapasitesi
- o^v : sahip olunan $v \in V$ tipi araç sayısı
- oc^v : $v \in V$ tipi araç için araç işletme maliyeti
- rc^v : $v \in V$ tipi aracı kiralama maliyeti
- mhc_j : talep noktalarından $j \in H$ noktasındaki ADÜ'ye gelen birim akışı elleçleme maliyeti
- mhc_j^m : $j \in H$ noktasındaki ADÜ'ye $m \in M$ ulaşım yoluyla gelen birim akışı elleçleme maliyeti
- a_i : $i \in N$ noktasından bağlı olduğu ADÜ'ye gelen akışı taşımak için gerekli araç sayısı
- b_i : ADÜ'den $i \in N$ noktasına gidecek akışı taşımak için gerekli araç sayısı

Tekli atama kullanıldığı ve atama bağlantılarında tek tip araç işletildiği için a_i ve b_i aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$a_i = \left\lceil \frac{o_i}{u} \right\rceil, \quad b_i = \left\lceil \frac{d_i}{u} \right\rceil$$

Burada $O_i = \sum_{j \in N} w_{ij}$, $D_i = \sum_{j \in N} w_{ji}$ ve u ise atama bağlantılarında kullanılan aracın kapasitesini göstermektedir.

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \in N \text{ noktası } j \in H \text{ noktasında kurulmuş olan bir ADÜ'ye atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

($x_{jj} = 1$ $j \in H$ noktasında bir ADÜ kurulduğunu göstermektedir)

$$y_j^{mq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \in H \text{ noktasına } q \in Q \text{ kapasitede } m \in M \text{ ulaşım yolunu kullanan} \\ & \text{bir ADÜ kurulmuşsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$f_{ijk}^v = k \in N$ noktasından çıkan ve $i \in H$ noktasındaki ADÜ'den $j \in H$ noktasındaki ADÜ'ye direkt gitmek için kullanılan $v \in V$ tipi araçla giden akışın miktarı

$z_{ij}^v = i \in H$ noktasındaki ADÜ'den $j \in H$ noktasındaki ADÜ'ye direkt gidiş için kullanılan $v \in V$ tipi araç sayısı

$r^v =$ kiralanın $v \in V$ tipi araç sayısı

Yukarıda tanımlanan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri kullanılarak oluşturulan matematiksel model aşağıda sunulmaktadır:

Matematiksel Model

En küçükle

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} c_{ij} a_i x_{ij} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} c_{ji} b_i x_{ij} + \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{v \in V} (c_{ij}^v + o c^v) z_{ij}^v + \sum_{v \in V} r c^v r^v + \\
 & \sum_{j \in H} f c_j x_{jj} + \sum_{j \in H} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} k c_j^{mq} y_j^{mq} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} m h c_j O_i x_{ij} + \\
 & \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} \sum_{k \in N} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V_m} m h c_j^m f_{ijk}^v
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

kısıtları altında

$$\sum_{j \in H} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \tag{4.2}$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in N, j \in H \tag{4.3}$$

$$\sum_{q \in Q} y_j^{mq} \leq x_{jj} \quad \forall j \in H, m \in M \tag{4.4}$$

$$\sum_{j \in H: i \neq j} z_{ij}^v \leq \sum_{q \in Q} k^{vq} y_i^{mq} \quad \forall i \in H, v \in V_m, m \in M \tag{4.5}$$

$$\sum_{i \in H: i \neq j} z_{ij}^v \leq \sum_{q \in Q} k^{vq} y_j^{mq} \quad \forall j \in H, v \in V_m, m \in M \tag{4.6}$$

$$\sum_{j \in H: j \neq i} \sum_{v \in V} f_{ijk}^v - \sum_{j \in H: j \neq i} \sum_{v \in V} f_{jik}^v = O_k x_{ki} - \sum_{l \in N} w_{kl} x_{li} \quad \forall i \in H, k \in N \tag{4.7}$$

$$\sum_{k \in N} f_{ijk}^v \leq u^v z_{ij}^v \quad \forall i, j \in H: i \neq j, v \in V \tag{4.8}$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in H} z_{ij}^v \leq o^v + r^v \quad \forall v \in V \tag{4.9}$$

$$f_{ijk}^v \geq 0 \quad \forall i, j \in H: i \neq j, k \in N, v \in V \tag{4.10}$$

$$z_{ij}^v \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall i, j \in H: i \neq j, v \in V \tag{4.11}$$

$$r^v \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall v \in V \tag{4.12}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in H \tag{4.13}$$

$$y_j^{mq} \in \{0,1\} \quad \forall i \in H, m \in M, q \in Q \tag{4.14}$$

Amaç fonksiyonunda (4.1) toplam maliyet en küçüklenmektedir. Amaç fonksiyonundaki ilk terim talep noktalarının bağlı oldukları ADÜ'lere gönderdikleri akışı taşımak için oluşan maliyeti, ikinci terim ise ADÜ'lerden talep noktalarına gönderilen akışı taşımak için oluşan maliyeti hesaplamaktadır. Üçüncü terim ADÜ'ler arasında hizmet veren farklı araç tipleri için ulaşım ve araç işletme maliyetlerinden oluşmaktadır. Dördüncü terim araç kiralama durumunda kiralanan araç tipine göre oluşan maliyeti hesaplamaktadır. Beşinci terim ADÜ açma maliyetlerinden, altıncı terim ise kurulacak olan ADÜ'nün hizmet verdiği ulaşım yolu ve kapasitesine göre oluşan ADÜ kurma maliyetlerinden oluşmaktadır. Son iki terim ise elleçleme maliyetlerini hesaplamaktadır. Bunlardan birincisi talep noktalarından ADÜ'lere gelen akışı elleçlemek için oluşan maliyeti ikincisi ise ADÜ ağındaki farklı ulaşım yollarını kullanarak ADÜ'lere gelen akışı elleçlemek için oluşan maliyeti hesaplamaktadır.

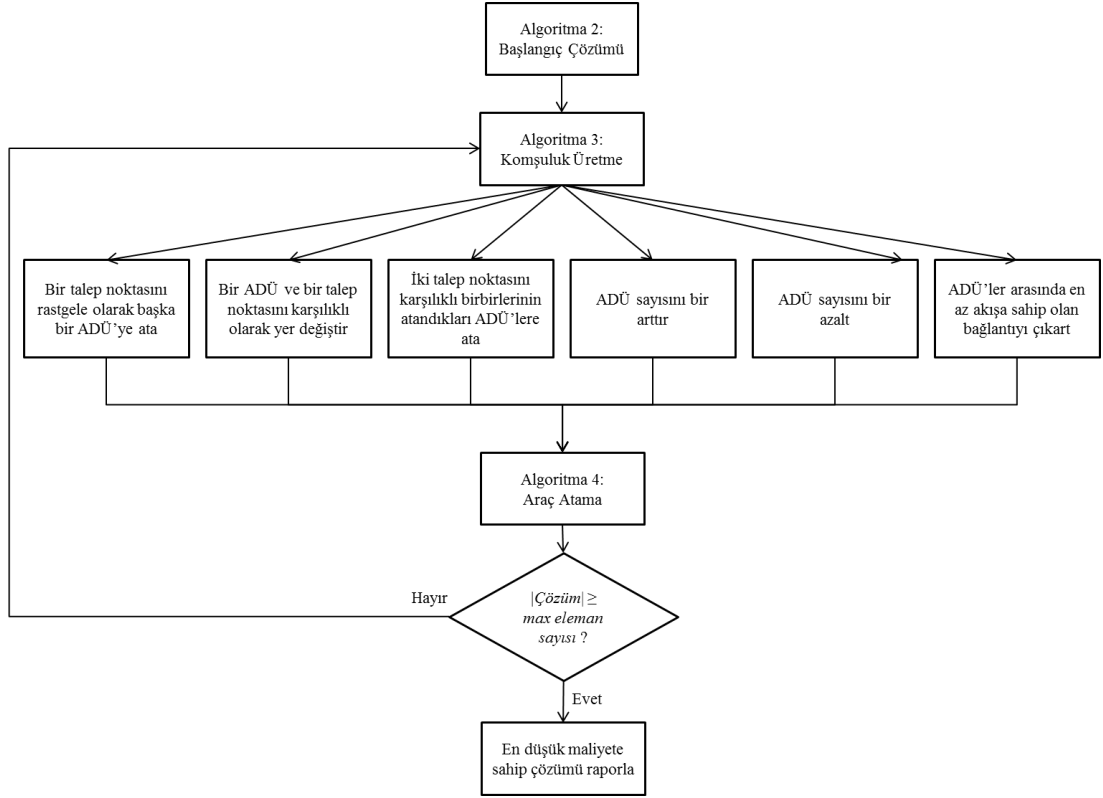
Kısıt (4.2) tekli atama kısıtıdır. Her bir talep noktasının yalnızca bir adet ADÜ'ye atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.3) talep noktalarının yalnızca ADÜ kurulan noktalara atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.4) sayesinde bir noktaya farklı ulaşım yollarına hizmet verebilen tek çeşit kapasitede ADÜ kurulmasına izin verilmektedir. (4.5) ve (4.6) numaralı kısıtlar ADÜ'lerin elleçleyebileceği araç sayılarına ait kapasite kısıtlarıdır. Bu kısıtlar sayesinde bir ADÜ'ye gelen ve bir ADÜ'den çıkan araçların sayısı ilgili ADÜ'nün elleçleyebileceği araç sayısını aşamaz. (4.7) numaralı kısıt akış dengesi kısıtıdır. Bu kısıt ile tüm talep noktalarının ADÜ'ler üzerinden gönderilen ve alınan toplam akışlarının, talep noktalarına gelen ve giden toplam akışa eşit olması sağlanır. Bu kısıt sayesinde tüm başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki akış ağ üzerinde rotalanmaktadır. Kısıt (4.8) araçların taşıma kapasitelerine ait kısıttır. Bu kısıt sayesinde ADÜ ağında hizmet verecek araçların sayıları belirlenmektedir. Kısıt (4.9) ise kullanılan araç sayısının sahip olunan ve kiralanan araç sayısını aşmamasını sağlayan kısıttır. Bu kısıt sayesinde kiralanan araç sayıları belirlenmektedir. (4.10)-(4.14) kısıtları karar değişkenlerinin tanım kümelerini belirtmektedir.

5 SEZGİSEL ALGORİTMA

Oluşturulan karma tamsayılı matematiksel model ile Türkiye verileri kullanılarak yapılan denemelerde ticari çözümler ile makul sürelerde sonuç alınmadığından problemin çözümü için bir sezgisel algoritma geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu bölümde geliştirilen sezgisel algoritma anlatılmaktadır.

Sezgisel algoritmanın çalışma prensibi şu şekildedir; öncelikle ADÜ yerlerinin belirlendiği ve talep noktalarının ADÜ'lere atandığı bir başlangıç çözümü oluşturulmakta ve bu başlangıç çözümüne komşuluk üretme teknikleri uygulanarak farklı çözümler üretilmektedir. Oluşturulan başlangıç çözümünde ve komşu çözümlerde ADÜ yerleri, talep noktalarının atamaları ve ADÜ ağının tasarımı kararları bilinmektedir. Bu çözümlerde ADÜ ağında hizmet veren araç sayıları ve ADÜ kapasiteleri bulunmadığından her bir çözüme ayrıca açgözlü bir araç atama algoritması uygulanarak ADÜ ağındaki bağlantılar üzerinde kullanılan araçların cinsleri ve sayıları ile ADÜ kapasiteleri belirlenmektedir. Algoritmaya ait genel akış şeması (Şekil 5.1) ve adımları (Algoritma 1) aşağıda sunulmaktadır.

Algoritma 2: Başlangıç Çözümü algoritmasının çalışma prensibi şu şekildedir. Öncelikle tüm potansiyel ADÜ noktaları ($\forall j \in H$) için $\frac{f c_j}{o_j + d_j}$ değeri hesaplanıp küçükten büyüğe doğru sıralanır ve bunlardan ilk p tanesi ADÜ olarak seçilir. p değeri başlangıç çözümünde bulunacak olan ADÜ sayısını göstermektedir ve algoritmanın bir girdisidir. Daha sonra her bir talep noktası kendisine en yakın ADÜ'ye atanır. Atamalar gerçekleştirildikten sonra tam serim ağ yapısına göre ADÜ'ler arasında oluşacak olan akışlar hesaplanır. Başlangıç çözümü algoritmasının adımları aşağıda verilmektedir.



Şekil 5.1: Algoritma 1: Genel Algoritma akış şeması.

Algoritma 1: Genel Algoritma

Girdi: Model için gerekli tüm parametreler, *max eleman sayısı*

Çıktı: ADÜ yerleri ve kapasiteleri (y_j^{mq}), talep noktalarının ADÜ'lere atanması (x_{ij}), ADÜ ağındaki akışlar (f_{ijk}^v), ADÜ ağı üzerinde kullanılan araç sayıları (z_{ij}^v), kiralanan araç sayıları (r^v)

- 1: $\text{Çözüm} = \emptyset, \text{Komşu} = \emptyset$
 - 2: **Algoritma 2: Başlangıç Çözümü** ile başlangıç çözümü oluştur ve *Komşu* kümesine ekle
 - 3: **tekrar et**
 - 4: *Komşu* kümesinden sıradaki komşuyu seç
 - 5: **Algoritma 3: Komşuluk Üretme** uygulayarak bu komşunun tüm komşularını oluştur ve oluşturulan tüm yeni komşuları *Komşu* kümesine ekle.
 - 6: **Algoritma 4: Araç Atama** uygulayarak komşunun toplam maliyetini hesapla ve komşuyu *Komşu* kümesinden silip *Çözüm* kümesine ekle
 - 7: **olana kadar** $|\text{Çözüm}| \geq \text{max eleman sayısı}$
 - 8: *Çözüm* kümesinde en düşük maliyete sahip çözümü raporla.
-

Algoritma 2: Başlangıç Çözümü

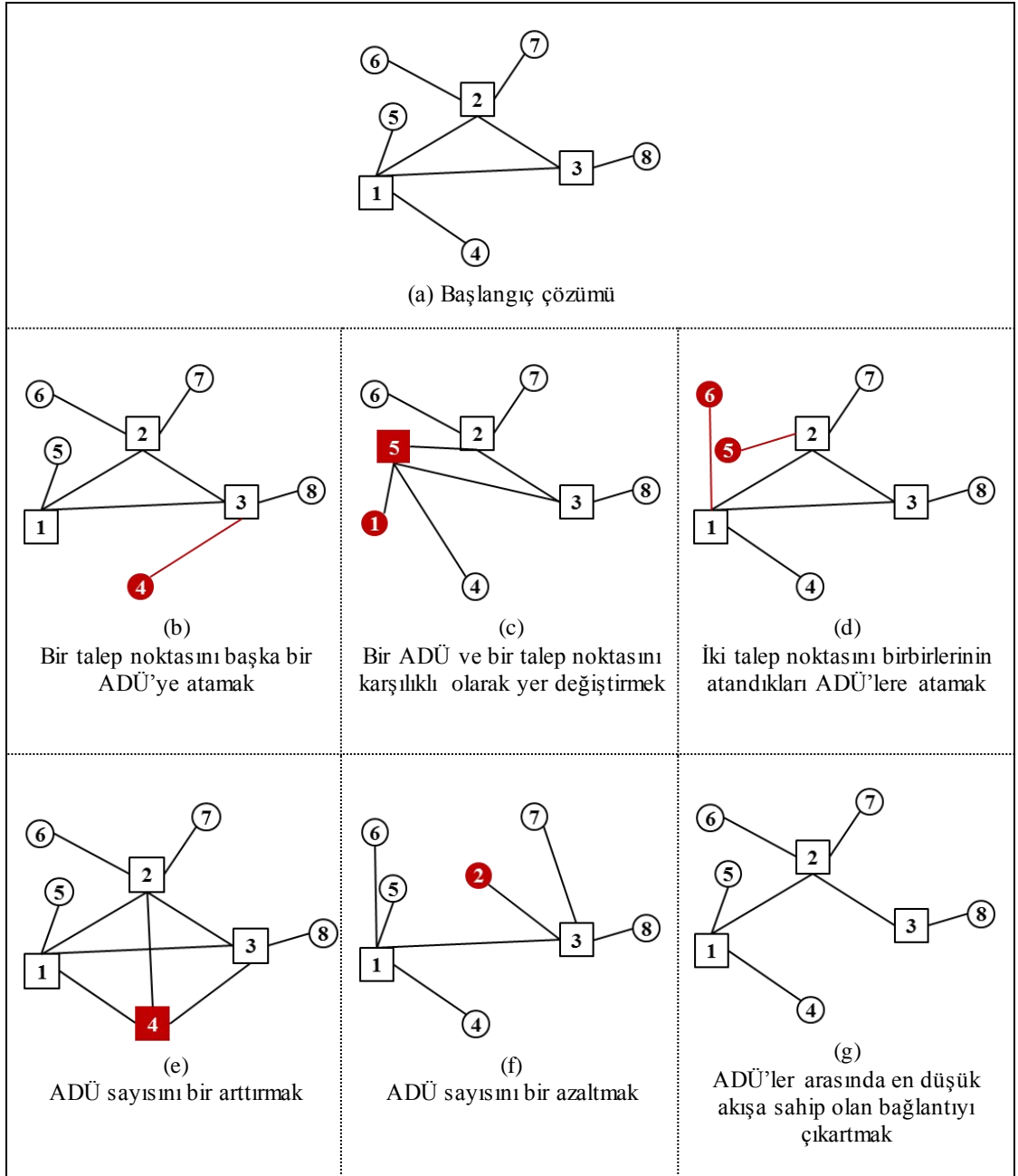
Girdi: N, H, p , tüm $i \in N, j \in H$ için f_{c_j}, O_j, D_j

Çıktı: ADÜ yerleri (x_{jj}), talep noktalarının ADÜ'lere atanması (x_{ij}), ADÜ ağındaki akış (f_{ijk})

- 1: Her bir $j \in H$ için $\frac{f_{c_j}}{O_j + D_j}$ hesapla
 - 2: Bu değerleri küçükten büyüğe doğru sırala ve ilk p tanesini ADÜ olarak seç
 - 3: Her bir talep noktasını kendisine en yakın ADÜ'ye ata
 - 4: Tam serim ağ yapısına göre her bir ADÜ'den diğer tüm ADÜ'lere oluşacak akışı hesapla
-

Komşuluk üretimi için daha önce literatürde Gomes vd. [1] tarafından uygulanmış ve başarılı sonuçlar vermiş olan komşuluk üretme tekniklerinden de faydalanılarak altı farklı komşuluk üretme yöntemi geliştirilmiştir. Şekil 5.2'de sekiz düğümlü bir örnek üzerinde her bir komşuluk üretme tekniğinin ne şekilde uygulandığı gösterilmektedir. Şekil 5.2a'da üzerinde komşuluk üretme tekniklerinin uygulandığı başlangıç çözümü verilmektedir. Şekil 5.2b'de talep noktası 4 atanmış olduğu ADÜ 1 yerine rastgele olarak seçilmiş ADÜ 3'e atanmaktadır. Şekil 5.2c'de ADÜ 1 ve talep noktası 5 karşılıklı olarak yer değiştirmekte, düğüm 1 talep noktası, düğüm 5 ise ADÜ olmaktadır. Şekil 5.2d'de talep noktaları 5 ve 6 karşılıklı olarak birbirlerinin atandıkları ADÜ'lere atanmaktadır. Şekil 5.2e'de talep noktası 4 ADÜ olarak seçilmekte ve böylelikle ADÜ sayısı bir arttırılmakta, Şekil 5.2f'de ise düğüm 2'deki ADÜ kaldırılarak ADÜ sayısı bir azaltılmaktadır. Son olarak Şekil 5.2g'de ADÜ'ler arasında en düşük akışa sahip olan bağlantının çıkartılması gösterilmektedir.

Komşuluk üretme algoritmasının adımları Algoritma 3'de verilmektedir. Bir başlangıç çözümü oluşturulduktan sonra, her biri başlangıç çözümüne uygulanmak üzere altı farklı komşuluk üretme tekniği sırayla gerçekleştirilir. Daha sonra oluşturulmuş olan altı çözümün her birine yine sırayla komşuluk üretme teknikleri uygulanır ve belirlenen sayıda çözüm üretilene kadar yeni komşular üretilmeye devam edilir. İlk üç komşuluk üretme yönteminde daha önce bulunmuş komşuların tekrar edilmesi olası olduğundan, daha önce üretilmiş bir çözümün tekrar bulunması halinde maksimum iterasyon sayısına kadar daha önce bulunmamış bir çözüm araştırılır.



Şekil 5.2: Komşuluk üretme teknikleri.

Algoritma 3: Komşuluk Üretme

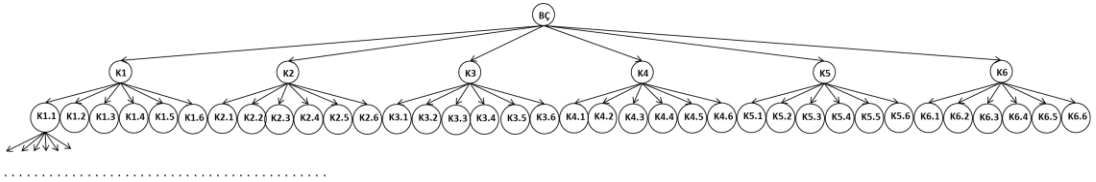
Girdi: max iterasyon sayısı, ADÜ yerleri (x_{jj}), talep noktalarının ADÜ'lere atanması (x_{ij}), ADÜ ağındaki akışlar (f_{ijk})

Çıktı: ADÜ yerleri (x_{jj}), talep noktalarının ADÜ'lere atanması (x_{ij}), ADÜ ağındaki akışlar (f_{ijk})

- 1: İterasyon sayısı = 0
 - 2: Bir talep noktasını rastgele olarak başka bir ADÜ'ye ata
 - 3: **Eğer** bu daha önce bulunmuş bir komşu ise
 - 4: **Eğer** iterasyon sayısı < max iterasyon sayısı ise güncelle iterasyon sayısı = iterasyon sayısı + 1 ve Adım 2'ye dön
 - 5: **Değilse** Adım 7'ye geç
 - 6: **Değilse** ADÜ ağındaki yeni akışları hesapla, Komşu kümesine ekle, iterasyon sayısını sıfırla ve Adım 7'ye geç
 - 7: Bir ADÜ ve bir talep noktasını karşılıklı olarak yer değiştir
 - 8: **Eğer** bu daha önce bulunmuş bir komşu ise
 - 9: **Eğer** iterasyon sayısı < max iterasyon sayısı ise güncelle iterasyon sayısı = iterasyon sayısı + 1 ve Adım 7'ye dön
 - 10: **Değilse** Adım 12'ye geç
 - 11: **Değilse** ADÜ ağındaki yeni akışları hesapla, Komşu kümesine ekle, iterasyon sayısını sıfırla ve Adım 12'ye geç
 - 12: İki talep noktasını karşılıklı olarak birbirlerinin atandıkları ADÜ'lere ata
 - 13: **Eğer** bu daha önce bulunmuş bir komşu ise
 - 14: **Eğer** iterasyon sayısı < max iterasyon sayısı ise güncelle iterasyon sayısı = iterasyon sayısı + 1 ve Adım 12'ye dön
 - 15: **Değilse** Adım 17'ye geç
 - 16: **Değilse** ADÜ ağındaki yeni akışları hesapla, Komşu kümesine ekle, iterasyon sayısını sıfırla ve Adım 17'ye geç
 - 17: ADÜ'ler arasında en az akışa sahip olan ayrıtı seç
 - 18: **Eğer** ADÜ Sayısı ≥ 3 ise
 - 19: **Eğer** bağlantı daha önce başka bir bağlantı üzerinden gönderilen akış içermiyor ise seçilen bağlantıyı kaldır, kaldırılan bağlantıdaki akışı yeni ADÜ ağındaki en kısa yol üzerinden rotala ve Komşu kümesine ekle
 - 20: **Değilse** Adım 22'e geç
 - 21: **Değilse** Adım 22'e geç
 - 22: ADÜ sayısını bir arttır
 - 23: ADÜ kurulmamış noktalar içerisinde en küçük $\frac{fc_j}{o_j+d_j}$ değerine sahip noktaya ADÜ kur
 - 24: Yeni kurulan ADÜ'den diğer tüm ADÜ'lere direkt bağlantı kur
 - 25: Her bir talep noktasını kendisine en yakın ADÜ'ye ata
 - 26: ADÜ'ler arasında oluşacak akışı hesapla ve Komşu kümesine ekle
 - 27: ADÜ sayısını bir azalt
 - 28: ADÜ kurulmuş noktalar içerisinde en büyük $\frac{fc_j}{o_j+d_j}$ değerine sahip noktaya kurulmuş olan ADÜ'yü kaldır
 - 29: Her bir talep noktasını kendisine en yakın ADÜ'ye ata
 - 30: ADÜ'ler arasında oluşacak akışı hesapla ve Komşu kümesine ekle
-

Komşuluk üretiminin yapısı Şekil 5.3'de sunulmaktadır. Bu şekilde, BÇ başlangıç çözümünü göstermektedir. K1, K2, K3, K4, K5 ve K6 komşu çözümleri, başlangıç çözümü üretildikten sonra Algoritma 3'ün bir kere çalışması sonucu oluşmakta ve her biri komşu kümesine eklenmektedir. Örnek olarak K1 çözümünü ele alacak

olursak; başlangıç çözümüne birinci komşuluk üretme tekniği olan, bir talep noktasını başka bir ADÜ'ye atama işleminin uygulanması sonucu K1 komşu çözümü oluşmakta ve komşu kümesine eklenmektedir. Başlangıç çözümünün tüm komşuluğu oluşturulduktan sonra komşu kümesindeki her bir elemana yine komşuluk üretme teknikleri uygulanmaktadır. Bu tekniklerin K1 çözümüne uygulanması yani Algoritma 3'ün K1 çözümü için bir kez çalışması sonucu K1.1, K1.2, K1.3, K1.4, K1.5 ve K1.6 çözümleri üretilmektedir. Bu çözümlerden K1.1, K1 çözümüne birinci komşuluk üretme tekniğinin, K1.2 ise ikinci komşuluk üretme tekniğinin uygulandığını göstermektedir. Şekil 5.3'deki diğer numaralandırmalar da aynı düzeni ifade etmektedir. Yani enlemesine arama (breadth first search) kuralına göre komşuluk üretilmektedir. Üretilen tüm komşulara daha sonra yine enlemesine arama kuralına göre araç atama algoritması uygulanmakta ve problem için olurlu bir çözüm elde edilmektedir. Geliştirilen sezgisel algoritma çözüm kümesindeki eleman sayısı maksimum eleman sayısına ulaşana kadar çalıştırılmaktadır.



Şekil 5.3: Komşuluk üretim yapısı.

Araç atama algoritması, farklı ulaşım yollarını kullanan farklı tipteki araçların ADÜ ağındaki bağlantılara atanmasını gerçekleştirmektedir. Geliştirilen bu algoritma açgözlü bir algoritmadır ve gerçek hayat gözlemlerinden elde edilen veriler ışığında tasarlanmıştır. Araç tipleri olarak hava yolunu kullanan uçaklar ile kara yolunu kullanan tır ve kamyonlar kullanılmaktadır. Araç atama algoritması bu tez kapsamında sadece üç araç tipi için geliştirilse dahi daha fazla araç tipinin de algoritmaya eklenmesi mümkündür. ADÜ kapasiteleri ADÜ'lerin elleçledikleri araç sayılarına bağlı olduğundan ADÜ'lerin kapasiteleri araç atama algoritması sonrasında belirlenmektedir. Algoritmanın adımları Algoritma 4'te sunulmaktadır. Araç atama algoritmasının çalışma prensibi şu şekildedir; ADÜ'ler arasındaki ayrıtlara öncelikle sahip olunan uçaklar, sonra tırlar ve sonrasında da kamyonlar

atanmakta eğer hala araca ihtiyaç var ise tır ve kamyon kiralanmaktadır. Gerçek hayat gözlemlerinden elde edilen veriler ışığında uçak kiralamak çok maliyetli olduğundan bu algorithmada ele alınmamaktadır. Ancak algoritmanın uçak kiralamayı da ele alacak şekilde modifiye edilebilmesi kolayca mümkündür.

Atanan araçların sırasına göre iki farklı araç atama algoritması geliştirilmiştir, birinde akış her zaman önce sahip olunan tırlara atanmakta sonrasında sahip olunan kamyonlara geçilmekte iken diğerinde ise eğer ayrıt üzerinde kalan akış bir kamyonu sığabilecek ise bu akış önce kamyonu yüklenmektedir. Algoritma adımlarında I ile gösterilenler her zaman önce tıra atanma durumunu, II ile gösterilenler ise önce kamyonu sığabilecek akışların atanması durumunu belirtmektedir.

ADÜ kapasiteleri araç atama algoritmasının bir çıktısıdır. Algorithmaya göre, ayrıtlara araçlar atanırken büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri maksimum araç sayısının aşılmaması sağlanmaktadır. Tüm ayrıtlar için araç atamaları gerçekleştirildikten sonra kullanılan araç sayılarına göre hangi kapasitede ADÜ kurulması gerektiği belirlenmektedir. Algoritma büyük ve küçük olmak üzere iki farklı kapasitede ADÜ için oluşturulmuştur. Ancak algoritmanın ikiden fazla ADÜ kapasitesini ele alacak şekilde modifiye edilebilmesi kolayca mümkündür.

Algoritma 4: Araç Atama

Girdi: ADÜ yerleri (x_{ij}), talep noktalarının ADÜ'lere atanması (x_{ij}), ADÜ ağındaki akışlar (f_{ijk}), sahip olunan araç sayıları (o^v), büyük ve küçük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları (k^{vq}), araçların taşıma kapasiteleri (u^v)

Çıktı: ADÜ kapasiteleri (y_j^{mq}), ADÜ ağında hizmet veren araçlar (z_j^v), kiralanmış araç sayıları (r^v)

- 1: *Kullanılan uçak sayısı = 0, Kullanılan tır sayısı = 0, Kullanılan kamyon sayısı = 0*
 - 2: *Ayrıtları üzerlerindeki akışa göre büyükten küçüğe doğru sırala*
 - 3: *Daha önce uçak atanmamış olan en yüksek akışa sahip ayrıtı seç*
 - 4: **tekrar et**
 - 5: **Eğer** *Kullanılan uçak sayısı < Sahip olunan uçak sayısı ise*
 - 6: **Eğer** *Araçın çıkış ve varış ADÜ'lerinin elleçledikleri uçak sayısı < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri uçak sayısı ise* seçilen ayrıta bir adet uçak ata
 - 7: *Güncelle Kullanılan uçak sayısı = Kullanılan uçak sayısı + 1,*
Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış - Uçağın taşıma kapasitesi
 - 8: **Değilse** *Adım 3'e geç*
 - 9: **Değilse** *Adım 11'e geç*
 - 10: **olana kadar** *Ayrıtta kalan akış < Uçağın taşıma kapasitesi*
 - 11: **Eğer** *herhangi bir araca atanmamış akış var ise ayrıtları üzerlerindeki akışa göre büyükten küçüğe doğru sırala, Değilse* *Adım 54'e git*
-

-
- 12: Daha önce üzerine tır atanmamış ve en yüksek akışa sahip olan ayrıtı seç
- 13: Hesapla *Yuvarla* (*Seçilen ayrıt üzerindeki akış / Tır taşıma kapasitesi*) = A
- 14: **Eğer** *Kullanılan tır sayısı + A < Sahip olunan tır sayısı* ise
- 15: **Eğer** *Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için A adet tır < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* ise seçilen ayrıta A adet tır ata ve Adım 12'ye git
- 16: **Değilse** *Ayrıta Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* sınırına kadar tır ata
- 17: Güncelle *Kullanılan tır sayısı* ve *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Tıra atanan toplam akış miktarı*
- 18: **I. Eğer** *Ayrıtta kalan akış ≥ 0* ise ve **Eğer** *Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için A + 1 adet tır < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* ise ve **Eğer** *Kullanılan tır sayısı + A + 1 < Sahip olunan tır sayısı* ise seçilen ayrıta bir adet daha tır ata ve Adım 12'ye git
- II. Eğer** *Ayrıtta kalan akış \geq Kamyonların taşıma kapasitesi* ise ve **Eğer** *Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için A + 1 adet tır < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* ise ve **Eğer** *Kullanılan tır sayısı + A + 1 < Sahip olunan tır sayısı* ise seçilen ayrıta bir adet daha tır ata ve Adım 12'ye git
- 19: **Değilse** Adım 12'ye git
- 20: **Değilse**
- 21: **Eğer** *Sahip olunan tır sayısı – Kullanılan tır sayısı < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* ise ayrıta *Sahip olunan tır sayısı – Kullanılan tır sayısı* adet tır ata ve Adım 12'ye git
- 22: **Değilse** *Ayrıta Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* sınırına kadar tır ata
- 23: Güncelle *Kullanılan tır sayısı*, *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Tıra atanan toplam akış miktarı* ve Adım 24'e geç
- 24: **Eğer** herhangi bir araca atanmamış akış var ise ayrıtları üzerlerindeki akışa göre büyükten küçüğe doğru sırala, **Değilse** Adım 54'e git
- 25: Daha önce kamyon atanmamış olan en yüksek akışa sahip ayrıtı seç
- 26: Hesapla *Yukarıyuvarla* (*Seçilen ayrıt üzerindeki akış / Kamyonların taşıma kapasitesi*) = B
- 27: **Eğer** *Kullanılan kamyon sayısı + B < Sahip olunan kamyon sayısı* ise
- 28: **Eğer** *Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için B adet kamyon < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı* ise seçilen ayrıta B adet kamyon ata ve Adım 25'e git
- 29: **Değilse** *Ayrıta Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı* sınırına kadar kamyon ata
- 30: Güncelle *Kullanılan kamyon sayısı* ve *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Kamyona atanan toplam akış miktarı*
- 31: Adım 25'e git
- 32: **Değilse;**
- 33: **Eğer** *Sahip olunan kamyon sayısı – Kullanılan kamyon sayısı < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı* ise seçilen ayrıta *Sahip olunan kamyon sayısı – Kullanılan kamyon sayısı* adet kamyon ata ve Adım 25'e git
- 34: **Değilse** *Ayrıta Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı* sınırına kadar kamyon ata
- 35: Güncelle *Kullanılan kamyon sayısı*, *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Kamyona atanan toplam akış miktarı* ve Adım 36'ya geç
- 36: **Eğer** araca atanmamış akış var ise ayrıtları üzerlerindeki akışa göre büyükten küçüğe doğru sırala, **Değilse** Adım 54'e git
- 37: **Eğer** araca atanmamış akışa sahip tüm ayrıtlar tır kiralanması için incelendiyse Adım 46'e git, **Değilse** devam et
- 38: Daha önce tır kiralanmamış en yüksek akışa sahip olan ayrıtı seç
- 39: **Eğer** *Ayrıt üzerindeki akış \leq Kamyonların taşıma kapasitesi* ise Adım 49'a git **Değilse** devam et
- 40: Hesapla *Yuvarla* (*Seçilen ayrıt üzerindeki akış / Tırların taşıma kapasitesi*) = C
- 41: **Eğer** *Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için daha önce atanmış tır sayısı + C < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* ise seçilen ayrıta C adet tır ata ve Adım 37'e git
- 42: **Değilse** *Ayrıta Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı* sınırına kadar tır ata
- 43: Güncelle *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Tıra atanan toplam akış miktarı* ve
-

-
- Adım 37'e git
- 44: **I. Eğer** *Ayrıtta kalan akış ≥ 0 ise ve **Eğer** Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için daha önce atanmış tır sayısı + $C + 1$ adet tır < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı ise ayrıta bir adet daha tır ata ve Adım 37'e git*
II. Eğer *Ayrıtta kalan akış \geq Kamyonların taşıma kapasitesi ise ve **Eğer** Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için daha önce atanmış tır sayısı + $C + 1$ adet tır < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri tır sayısı ise ayrıta bir adet daha tır ata ve Adım 37'e git*
- 45: **Değilse** Adım 37'ye git
- 46: **Eğer** araca atanmamış akış var ise ayrıtları üzerlerindeki akışa göre büyükten küçüğe doğru sırala, **Değilse** Adım 54'e git
- 47: **Eğer** araca atanmamış akışa sahip tüm ayrıtlar kamyon kiralınması için incelendiyse Adım 53'e git, **Değilse** devam et
- 48: Daha önce kamyon kiralınmamış en yüksek akışa sahip olan ayrıtı seç
- 49: Hesapla *Yukarıyuvarla (Seçilen ayrıt üzerindeki akış / Kamyonların taşıma kapasitesi) = D*
- 50: **Eğer** Aracın çıkış ve varış ADÜ'leri için daha önce atanmış kamyon sayısı + D adet kamyon < Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı ise seçilen ayrıta D adet kamyon ata ve Adım 47'ye git
- 51: **Değilse** Büyük ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri kamyon sayısı sınıma kadar kamyon ata
- 52: Güncelle *Ayrıtta kalan akış = Başlangıçtaki akış – Kamyona atanan toplam akış miktarı ve Adım 47'ye git*
- 53: **Eğer** ADÜ kapasitelerinden dolayı araçlara yüklenememiş akışlara sahip bağlantılar var ise komşuyu sil, **Değilse** Adım 54'e gir
- 54: Toplam maliyeti hesapla, çözümü Çözüm kümesine ekle
-

Kargo şirketlerinde yapılan gözlemler sonucu elde edilen veriler kullanılarak araçları kullanmanın birim maliyeti, araç işletme maliyetleri ve araçların taşıma kapasiteleri göz önüne alınmış ve farklı araç tipleri için bir ton kargoyu bir km taşımının maliyetleri hesaplanmıştır. Veriler bölüm 6.1'de detaylı olarak anlatılmaktadır. Elde edilen veriler tırların uçaklardan maliyet olarak daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle yukarıda verilmiş olan araç atama algoritmasına bir iyileştirme adımı eklenmiştir. Bu adımda algoritmanın sonunda elde edilen çözümde eğer elimizde yeterli sayıda tır var ise, bir adet uçağa yüklenmiş olan akış uçaktan alınıp tırlara yüklenmektedir.

Sezgisel algoritma Eclipse Java EE IDE, Version: Juno Service Release 1 programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir.

6 SEZGİSEL ALGORİTMANIN UYGULAMASI

Bu bölümde, öncelikle problemin çözümü için gerekli parametrelerin değerleri ve bu değerlerin ne şekilde elde edildikleri anlatılmaktadır. Daha sonra bu veriler kullanılarak sezgisel algoritmanın performansı optimal çözümler ile kıyaslanarak ölçülmektedir. Son olarak ise problem parametrelerinin sezgisel algoritma üzerine olan etkileri istatistiksel olarak analiz edilmektedir.

6.1 Problem Verileri

İkinci bölümde de anlatıldığı gibi kargo firmaları ve işleyişleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için Türkiye’de hizmet veren üç büyük kargo firmasına ait transfer merkezlerine ve şubelere ziyaretler gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümü için gerekli olan veriler yapılan bu ziyaretler sonucu elde edilen bilgiler ışığında oluşturulmuştur.

Tablo 6.1’de gerekli olan kümelere ait veriler bulunmaktadır. Talep noktaları ve potansiyel ADÜ yerleri kümesi Türkiye’deki 81 ilden oluşmaktadır. Hizmet verebildikleri araç sayılarına bağlı olarak küçük ve büyük olmak üzere iki farklı kapasitede ADÜ kurulabilmektedir. Ulaşım yolları kümesi Türkiye’de kargo taşımacılığı için kullanılmakta olan hava ve kara yollarını içermektedir. ADÜ’ler arasında hizmet verebilen araçlara ait küme ise hava yolunu kullanan tek tip uçaklar ile kara yolunu kullanan 15 ton kapasiteli kamyonlar ve 25 ton kapasiteli tırlardan oluşmaktadır. Talep noktaları ile ADÜ’ler arasındaki bağlantılarda ise 3,5 ton kapasiteli kamyonetler hizmet vermektedir. Kullanılan araç tipleri ve kapasitelerine ait bilgiler yapılan gerçek hayat gözlemleri ışığında oluşturulmuştur. Genel olarak sahip olunan araç sayısı ve çeşitleri kargo firmaları arasında küçük farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle en fazla kullanılmakta olan araç çeşitleri seçilmiştir.

Tablo 6.1: Kümelere ait bilgiler.

| Kümelere | Tanımlar | Değerler |
|----------|------------------------|-----------------------------|
| N | Talep noktaları | 81 il |
| H | Potansiyel ADÜ yerleri | 81 il |
| Q | ADÜ kapasiteleri | Küçük, Büyük |
| M | Ulaşım yolları | Kara yolu, Hava yolu |
| V | Araç tipleri | Kamyonet, Kamyon, Tır, Uçak |

Talep noktaları arasındaki talep (w_{ij}) verisi Çetiner vd. [51] çalışmasında kullanılmış olan veri kullanılarak elde edilmiştir. Yurtiçi Kargo'dan İstanbul'dan Ankara'ya taşınan günlük kargo miktarının yaklaşık 100 ton olduğu bilgisi edinildiğinden, bu bilgi doğrultusunda elimizdeki akış verisi ölçeklendirilerek modelin çözümünde kullanılabilir hale getirilmiştir.

Kargo şirketlerinden edinilen bilgiye göre atama bağlantıları üzerinde kullanılmakta olan 3,5 ton kapasiteli kamyonetler 1 km' de 0,5 TL'lik, ADÜ'ler arasında hizmet vermekte olan kamyonlar 1 TL'lik, tırlar 1,2 TL'lik, uçaklar ise 6,4 TL'lik yakıt tüketmektedir. Bağlantılar üzerinde farklı tip araçları kullanmanın birim maliyetleri (c_{ij}^p), iller arası mesafeler ve Mayıs 2013 itibari ile elde edilen bu bilgilerin ışığında oluşturulmuştur.

Her bir araç tipi için taşıma kapasiteleri ve yakıt maliyetleri Tablo 6.2'de özetlenmektedir. Kilometre başına yakıt maliyetinin aracın taşıma kapasitesine bölünmesi ile bir tonluk yükü bir kilometre taşımının maliyeti elde edilmiştir. Farklı kapasitelerde araçların kullanımı sonucu oluşan ölçek ekonomileri ile maliyetteki düşüşü görebilmek amacı ile ölçek ekonomisi parametresi olan α değerleri hesaplanmıştır. α değerleri, bir ton kargoyu bir km taşımının maliyeti kamyonetler için 1 TL kabul edildiğinde diğer araç tipleri için oluşan maliyeti göstermektedir. Önerdiğimiz problemde ton başına değil araç başına olan maliyetler (c_{ij}^p) kullanılmaktadır. Ancak literatürdeki diğer ADÜ yer seçimi çalışmaları ile kıyaslanması açısından faydalı olabileceği için α değerleri de hesaplanmıştır.

Tablo 6.2: Farklı araç tiplerine ait kapasite ve maliyet değerleri.

| | Kamyonet | Kamyon | Tır | Uçak |
|---|-----------------|---------------|------------|-------------|
| Taşıma kapasitesi, u^v (ton) | 3.5 | 15 | 25 | 200 |
| Yakıt maliyeti, c_{ij}^v (TL/km) | 0,5 | 1 | 1,2 | 6,4 |
| Yakıt maliyeti/Taşıma kapasitesi (TL/km.ton) | 0,143 | 0,067 | 0,048 | 0,032 |
| Ölçek ekonomisi parametresi, α | 1 | 0,467 | 0,336 | 0,224 |

Ele alınan diğer maliyet kalemleri arasında ADÜ açma maliyetleri, araç işletme maliyetleri, araç kiralama maliyetleri ve elleçleme maliyetleri bulunmaktadır. ADÜ açma maliyetleri arsa ve inşaa maliyetlerini içermektedir. Bu maliyetin büyük kısmı kurulacak olan ADÜ'nün kapasitesi ve hizmet verebildiği ulaşım yollarından bağımsız olarak oluşmakta iken bir bölümü de bu özelliklere göre oluşmaktadır. Bu bağlamda ADÜ'ler için gerekli arsa büyüklükleri göz önüne alınarak ortalama arsa fiyatları araştırılmış ve sabit ADÜ açma maliyetleri (fc_j) bu bilgiler doğrultusunda belirlenmiştir. Ayrıca ADÜ açma maliyeti 60.000 TL'den 120.000 TL'ye 10.000 TL'lik farklar ile arttırılarak bu parametredeki değişikliklerin sonuçlar üzerine olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. ADÜ açma maliyetinin kapasite ve kullanılan ulaşım yollarına bağılı olan kısmı (kc_j^{mq}) belirlenirken ise kapasite arttırımı durumunda ihtiyaç duyulacak arsa büyüklüğü ve kullanılan ulaşım yolunun gerektirdiği maliyetler göz önüne alınmıştır. $j \in H$ noktasına $m \in M$ ulaşım yoluna hizmet verebilen $q \in Q$ kapasitesi kurma maliyeti (kc_j^{mq}) kara yoluna hizmet veren küçük ADÜ'ler için 1000 TL, kara yoluna hizmet veren büyük ADÜ'ler için 1200 TL, hava yoluna hizmet veren küçük ADÜ'ler için 2500 TL ve hava yoluna hizmet veren büyük ADÜ'ler için 2800 TL olarak belirlenmiştir.

Şoför ve bakım maliyetlerini içeren araç işletme maliyetleri (oc^v) çalışan maaşları ve araçların hangi sıklıkta ne gibi bakımlar gerektirdiği konusunda yapılan araştırmalar sonucu uçaklar için 4000 TL, kamyon ve tırlar için ise 200 TL olarak belirlenmiştir. Ayrıca yapılan pazar araştırması sonucu araç kiralama maliyetleri uçaklar için 20.000 TL, kamyonlar için 1000 TL ve tırlar için de 1200 TL olarak belirlenmiştir.

Elleçleme maliyetleri kullanılan kaynaklar (bant konveyör, okuyucu sensör, operatörler) dikkate alınarak tahmini olarak belirlenmiştir. Talep noktalarından ADÜ'ye gelen birim akış için ve ADÜ'ler arasında kara yolunu kullanarak ADÜ'ye gelen bir ton akış için 1 TL, hava yolunu kullanarak ADÜ'ye gelen bir ton akış için ise 2 TL olarak belirlenmiştir.

Sahip olunan araç sayıları belirlenirken gerçek hayat gözlemlerinden faydalanılmış ve 10 adet uçak, 170 adet tır ve 200 adet kamyonu varsayılmıştır.

ADÜ'lerin elleçleyebileceği maksimum araç sayıları ADÜ kapasitesine göre değişmektedir. Sistemde büyük ve küçük olmak üzere iki farklı kapasitede ADÜ bulunmaktadır. ADÜ kapasiteleri için düşük ve yüksek olmak üzere iki farklı kapasite kümesi ele alınmıştır. Her bir kapasite kümesi için küçük ve büyük kapasitelerdeki ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri maksimum araç sayıları Tablo 6.3'de verilmektedir.

Tablo 6.3: ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları.

| | Düşük Kapasite Kümesi | | Yüksek Kapasite Kümesi | |
|---------------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Küçük ADÜ | Büyük ADÜ | Küçük ADÜ | Büyük ADÜ |
| Uçak | 6 | 12 | 10 | 20 |
| Tır | 35 | 70 | 50 | 100 |
| Kamyon | 60 | 120 | 75 | 150 |

Sezgisel algoritmanın performansını ölçebilmek için optimal çözümlere ihtiyaç vardır. Bu nedenle Türkiye verisinin bir bölümü kullanılmıştır. Şekil 6.1'de seçilmiş olan 16 ilin Türkiye haritası üzerindeki gösterimi verilmiştir. Bu 16 ilin seçilmesinin nedeni literatürde aynı veri kümesi ile daha önce Yaman vd. [52] tarafından yapılmış olan çalışmadır. 16 il ile gerçekleştirilen analizlerde sahip olunan araç sayıları ve ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları ölçeklendirilmiştir. 5 adet uçak, 20 adet tır ve 40 adet kamyonu varsayılmıştır. ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları ise Tablo 6.4'de verilen şekilde belirlenmiştir.

Tablo 6.4: 16 il ile gerçekleştirilen analizlerde ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları.

| | Düşük Kapasite Kümesi | | Yüksek Kapasite Kümesi | |
|---------------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Küçük ADÜ | Büyük ADÜ | Küçük ADÜ | Büyük ADÜ |
| Uçak | 3 | 6 | 2 | 4 |
| Tır | 10 | 20 | 7 | 14 |
| Kamyon | 15 | 30 | 12 | 24 |



Şekil 6.1: Kullanılan 16 noktanın Türkiye haritası üzerinde gösterimi.

Sezgisel algoritmanın performansını test edebilmek için Türkiye verisi dışında ADÜ yer seçimi problemlerinde sıklıkla kullanılmakta olan ABD'deki 25 şehir arasındaki havayolu taşımacılığı bilgilerini içeren CAB veri kümesi de kullanılmıştır. Bu veri kümesinin de problemin çözümünde kullanılabilir hale getirilmesi ve gerekli parametrelerin belirlenebilmesi için çalışmalar yapılmıştır. ADÜ açma maliyetleri ile ADÜ'nün kapasitesi ve hizmet verdiği ulaşım yollarına bağlı olarak değişen maliyet, araç işletme ve kiralama maliyetleri, elleçleme maliyetleri Türkiye'de kullanılan veri ile aynı alınmıştır. Sahip olunan araç sayısı ve ADÜ kapasiteleri bu veri kümesi için ayrıca belirlenmiştir. CAB verisi ile yapılan çalışmada büyük ADÜ'lerin 8 adet uçak, 40 adet tır ve 50 adet kamyon küçük ADÜ'lerin ise 4 uçak, 25 adet tır ve 30 adet kamyon elleçleyebileceği varsayılmıştır. Sahip olunan araç sayısı ise 7 adet uçak, 50 adet tır ve 70 adet kamyon olarak belirlenmiştir.

6.2 Sezgisel Algoritmanın Performansı

Bir önceki kısımda anlatıldığı gibi geliştirilen sezgisel algoritmanın performansını test edebilmek için 16 adet talep noktası ve 16 adet potansiyel ADÜ noktası içeren Türkiye verisi ile 25 adet talep noktası ve 25 adet potansiyel ADÜ noktası içeren CAB verisi kullanılmıştır.

Farklı başlangıç çözümleriyle ve farklı sayılarda çözümler üretilerek çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Başlangıç çözümünde yer alacak olan ADÜ sayısı (p) için n talep noktası sayısını göstermek üzere $\sqrt{n} - 2$, \sqrt{n} ve $\sqrt{n} + 2$ olmak üzere üç farklı değer kullanılmıştır. Bölüm 5'te anlatıldığı gibi komşuluk üretimi sırasında başlangıç çözümünde ele alınan ADÜ sayısının artırıldığı veya azaltıldığı komşular zaten incelenmektedir. Ayrıca üretilen çözüm sayısının (*max eleman sayısı*) sezgisel algoritmanın performansı üzerine etkisini görebilmek için farklı sayılarda çözümler üretilerek elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

Komşuluk üretimindeki rassallıktan dolayı her bir örnek için sezgisel algoritma ile beş farklı koşuturum gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde raporlanan sonuçlar beş farklı koşuturumun ortalamasını göstermektedir. Alınan tüm sonuçlar EK 2'de sunulmaktadır. Her bir örnek için optimal sonuçlar önerilen matematiksel modelin CPLEX 12.4 ile optimal olarak çözdürülmesinden elde edilmiştir. Tüm koşuturumlar 2xIntel Xeon 2.40 GHz işlemci 48 GB RAM özelliklerine sahip HP Z600 iş istasyonunda alınmıştır.

Türkiye verisi üzerinde sezgisel algoritma ile 6000 çözüm üretildiği ve yüksek kapasite kümesinin ele alındığı duruma ait sonuçlar Tablo 6.4'de verilmektedir. Tabloda ilk sütun ele alınan yedi farklı ADÜ açma maliyetini göstermektedir. Sabit maliyetin yanında yer alan iki sütun optimal çözüme ait amaç fonksiyonu değeri ve optimal çözüm süresi bilgilerini içermektedir. Optimal çözüm bilgilerinin yanında ise sezgisel algoritmaya ait bilgiler sunulmaktadır. Sezgisel algoritmaya ait bölümün ilk sütununda araç atama algoritması bilgisi bulunmaktadır. Sonrasında üç farklı

başlangıç ADÜ sayısı ile 6000 çözüm üretildiği durumda elde edilmiş olan sezgisel çözüm süresi ve optimal çözümden olan fark bilgisi verilmektedir. En alttaki iki satırda ise yedi farklı sabit maliyet ile elde edilen sonuçlara ait ortalama değerler sunulmaktadır.

Sezgisel algoritma ile elde edilen çözümün optimal çözümden uzaklığını ifade eden fark değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Fark(\%) = \frac{(Sezgisel\ amaç\ fonksiyonu - Optimal\ amaç\ fonksiyonu) * 100}{Optimal\ amaç\ fonksiyonu}$$

Tablo 6.5: Yüksek kapasite kümesi ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|
| | | | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | | $p = \sqrt{n} + 2$ | |
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 8 | 1,67 | 8 | 1,70 | 13 | 1,68 |
| | | | II | 10 | 1,52 | 7 | 1,60 | 11 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 9 | 1,52 | 9 | 1,55 | 13 | 1,56 |
| | | | II | 10 | 1,49 | 7 | 1,46 | 11 | 1,49 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 9 | 1,48 | 8 | 1,36 | 13 | 1,46 |
| | | | II | 10 | 1,39 | 6 | 1,40 | 12 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 9 | 1,39 | 8 | 1,23 | 13 | 1,40 |
| | | | II | 11 | 1,32 | 7 | 1,33 | 13 | 1,50 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 9 | 0,46 | 8 | 0,77 | 14 | 1,25 |
| | | | II | 11 | 0,49 | 6 | 0,84 | 11 | 1,18 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 8 | 0,07 | 7 | 0,71 | 13 | 1,85 |
| | | | II | 10 | 0,11 | 7 | 0,51 | 12 | 2,87 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 7 | 0,09 | 8 | 0,54 | 13 | 1,40 |
| | | | II | 8 | 0,08 | 8 | 0,39 | 13 | 2,45 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 8 | 0,95 | 8 | 1,12 | 13 | 1,52 |
| | | | II | 10 | 0,91 | 7 | 1,08 | 12 | 1,78 |

Tablo 6.5’de son iki satırdaki ortalama değerlere bakıldığında, başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n} - 2 = \sqrt{16} - 2 = 2$ adet ADÜ bulunduğu durumda sezgisel algoritma ile optimal çözümden I. tip araç atama kuralı ile ortalama %0,95 uzaklıkta, II. tip araç

atama kuralı ile ise ortalama %0,91 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. Başlangıç çözümü ADÜ sayısı $p = \sqrt{n} = 4$ olduğunda bu değerler sırasıyla %1,12 ile %1,08, $p = \sqrt{n} + 2 = 6$ olduğunda ise sırasıyla %1,52 ile %2,87 olmaktadır. Tablo 6.4'de optimal çözüm ile arasında en büyük fark bulunan çözümün farkı %2,87'dir, optimale en yakın çözüm için ise bu fark %0,07'dir. Çözüm süreleri $p = \sqrt{n} - 2$ ve $p = \sqrt{n}$ olduğu durumlarda birbirlerine çok yakındır. $p = \sqrt{n} + 2$ olduğu durumda ise çözüm süresinin diğer durumlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.

Yine üç farklı başlangıç çözümü ile ancak bu kez 12000 adet çözüm üretilerek elde edilen sezgisel algoritma çözümleri ile optimal çözümlerin kıyaslaması Tablo 6.6'da incelenmektedir.

Beklendiği gibi üretilen çözüm sayısı arttırıldığında $p = \sqrt{n} - 2$, $p = \sqrt{n}$ ve $p = \sqrt{n} + 2$ durumlarının hepsinde iki araç atama algoritması için de fark değerlerinin azaldığı görülmektedir. Başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n} - 2$ ADÜ bulunduğu durumda optimal çözümden I. tip araç atama için ortalama %0,92 uzaklıkta, II. tip araç atama için ise ortalama %0,90 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. Başlangıç çözümündeki ADÜ sayısı $p = \sqrt{n}$ olduğunda bu değerler %1,02 ile %0,97 olmaktadır. $p = \sqrt{n} + 2$ olduğunda ise farklar sırasıyla %1,40 ile %1,45 olmaktadır. Tablo 6.6'da optimal çözüm ile arasında en büyük fark bulunan çözümün farkı %1,90, optimale en yakın çözümün farkı ise %0,05'dir. Başlangıç çözümünde bulunan ADÜ sayıları arttıkça ortalama çözüm süreleri de artış göstermektedir.

Sezgisel algoritma ile daha fazla çözüm üretildiğinde daha iyi sonuçlar bulunabilmektedir. Ancak görüldüğü gibi optimal çözümden uzaklık bakımından 6000 ve 12000 çözüm üretildiği durumlar arasında çok büyük bir farklılık yoktur. Çözüm süresi ise 12000 çözüm üretildiği durumda 6000'e kıyasla yaklaşık olarak yedi kat artmıştır.

Tablo 6.6: Yüksek kapasite kümesi ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | | $p = \sqrt{n} + 2$ | |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 43 | 1,67 | 59 | 1,59 | 83 | 1,67 |
| | | | II | 42 | 1,52 | 77 | 1,60 | 38 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 44 | 1,52 | 55 | 1,54 | 100 | 1,56 |
| | | | II | 41 | 1,51 | 73 | 1,39 | 57 | 1,50 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 46 | 1,33 | 59 | 1,33 | 93 | 1,45 |
| | | | II | 40 | 1,40 | 68 | 1,38 | 77 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 43 | 1,36 | 54 | 1,38 | 98 | 1,37 |
| | | | II | 39 | 1,23 | 78 | 1,32 | 52 | 1,30 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 37 | 0,46 | 62 | 0,66 | 96 | 1,02 |
| | | | II | 32 | 0,47 | 69 | 0,65 | 98 | 1,18 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 39 | 0,06 | 68 | 0,57 | 95 | 1,34 |
| | | | II | 46 | 0,09 | 70 | 0,34 | 38 | 1,27 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 39 | 0,05 | 80 | 0,09 | 100 | 1,37 |
| | | | II | 43 | 0,09 | 70 | 0,11 | 58 | 1,90 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 42 | 0,92 | 62 | 1,02 | 95 | 1,40 |
| | | | II | 40 | 0,90 | 72 | 0,97 | 60 | 1,45 |

Sonuçlar elde edilirken sezgisel algoritma ile optimal sonucun elde edildiği örnekler de olmuştur. Ancak bu kısımda alınan beş koşturumun ortalaması raporlandığından yukarıdaki tablolarda bu örnekler görülememektedir. Tüm sonuçların verildiği EK 2’de bulunan tablolarda sezgisel algoritma ile optimal sonucun bulunduğu örnekler görülebilmektedir.

Aynı analizler ADÜ’lerin kapasitelerinin düşük olduğu durum için de gerçekleştirilmiştir. Sezgisel algoritma ile 6000 çözüm üretildiği ve düşük kapasite kümesinin ele alındığı duruma ait sonuçlar Tablo 6.7’de verilmektedir.

Tablo 6.7: Düşük kapasite kümesi ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | | $p = \sqrt{n} + 2$ | |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 9 | 1,69 | 8 | 1,72 | 11 | 1,73 |
| | | | II | 6 | 1,57 | 7 | 1,58 | 12 | 1,67 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 7 | 1,58 | 8 | 1,52 | 12 | 1,61 |
| | | | II | 6 | 1,50 | 7 | 1,47 | 10 | 1,59 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 7 | 1,44 | 7 | 1,50 | 12 | 1,50 |
| | | | II | 6 | 1,45 | 7 | 1,46 | 9 | 1,46 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 8 | 1,35 | 8 | 1,35 | 13 | 1,43 |
| | | | II | 6 | 1,38 | 7 | 1,36 | 12 | 1,36 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 7 | 0,93 | 8 | 0,74 | 11 | 1,42 |
| | | | II | 6 | 0,51 | 7 | 0,78 | 11 | 1,28 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 7 | 0,74 | 8 | 1,28 | 11 | 2,33 |
| | | | II | 6 | 0,19 | 7 | 0,74 | 11 | 2,04 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 7 | 0,39 | 7 | 0,89 | 13 | 3,56 |
| | | | II | 6 | 0,19 | 8 | 1,31 | 12 | 2,19 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 7 | 1,16 | 8 | 1,28 | 12 | 1,94 |
| | | | II | 6 | 0,97 | 7 | 1,24 | 11 | 1,66 |

Yüksek kapasite kümesi ile 6000 çözüm üretilen duruma kıyasla, düşük kapasite kümesi ile, optimal çözümden olan fark değerlerinde artış gözlemlenmektedir. $p = \sqrt{n} - 2$ durumunda I. tip araç atama ile %1,16 uzaklıkta II. tip araç atama ile ise ortalama %0,97 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. $p = \sqrt{n}$ durumunda ise I. ve II. tip araç ataması için sırasıyla %1,28 ve %1,24, $p = \sqrt{n} + 2$ durumunda ise optimal çözümden ortalamada %1,94 ile %1,66 uzaklıkta çözümler elde edilmektedir. Optimal çözümden en uzak çözümün farkı %3,56, en yakınki ise %0,19'dur. Daha önce incelenmiş sonuçlarda olduğu gibi başlangıç çözümünde bulunan ADÜ sayısı arttıkça çözüm süresi de artış göstermektedir. Ayrıca çözüm süreleri yüksek kapasite kümesi ile 6000 çözümün üretildiği durum ile kıyaslandığında belirgin bir farklılık görülmemektedir.

Düşük kapasite kümesi ile 12000 adet çözüm üretilerek elde edilen sezgisel algoritma çözümleri ile optimal çözümlerin kıyaslaması Tablo 6.8’de incelenmektedir.

Tablo 6.8: Düşük kapasite kümesi ile 12000 çözüm üretildiği durum

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|
| | | | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | | $p = \sqrt{n} + 2$ | |
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 63 | 1,68 | 61 | 1,54 | 38 | 1,72 |
| | | | II | 25 | 1,67 | 64 | 1,56 | 11 | 1,88 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 73 | 1,55 | 71 | 1,61 | 107 | 1,60 |
| | | | II | 26 | 1,53 | 57 | 1,47 | 64 | 1,56 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 67 | 1,36 | 63 | 1,52 | 34 | 1,51 |
| | | | II | 33 | 1,45 | 68 | 1,45 | 78 | 1,46 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 67 | 1,28 | 66 | 1,35 | 50 | 1,41 |
| | | | II | 33 | 1,31 | 52 | 1,38 | 71 | 1,30 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 69 | 0,72 | 59 | 0,61 | 103 | 1,18 |
| | | | II | 31 | 0,51 | 63 | 0,68 | 60 | 1,24 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 68 | 0,25 | 71 | 0,26 | 54 | 1,90 |
| | | | II | 28 | 0,16 | 58 | 0,31 | 48 | 1,81 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 67 | 0,28 | 54 | 0,22 | 69 | 1,71 |
| | | | II | 37 | 0,15 | 66 | 0,26 | 117 | 1,80 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 68 | 1,02 | 64 | 1,02 | 65 | 1,58 |
| | | | II | 30 | 0,97 | 61 | 1,01 | 64 | 1,58 |

6000 çözüm üretildiği durumdaki gibi 12000 çözüm üretilen durumda da düşük kapasite kümesi ile yüksek kapasite kümesine kıyasla fark değerleri artmıştır. $p = \sqrt{n} - 2$ durumunda fark değerleri I. tip araç atama için ortalama %1,02, II. tip araç atama için ise ortalama %0,97 olarak elde edilmiştir. $p = \sqrt{n}$ durumunda ise I. ve II. tip araç ataması için sırasıyla %1,02 ve %1,01, $p = \sqrt{n} + 2$ durumunda ise her iki araç atama tipi için de optimal çözümden ortalama olarak %1,58 uzaklıkta çözümler elde edilmektedir. Optimal çözüm ile arasında en büyük fark bulunan çözümün farkı %1,90, optimale en yakın çözümün ki ise %0,15’dir.

Yüksek kapasite kümesindeki gibi düşük kapasite kümesi ile de çözüm sayısı arttırıldığında uzaklık değerleri azalmış ancak çözüm süresi yine yaklaşık olarak yedi kat artmıştır.

Üretilen çözüm sayısının, başlangıç çözümünde bulunan araç sayısının ve araç atama algoritmalarının üretilen çözümlerin kalitesi üzerine etkisini daha iyi görebilmek için Tablo 6.9 oluşturulmuştur. Bu tabloda Tablo 6.5, 6.6, 6.7 ve 6.8'in son satırlarında sunulan ortalama değerler özetlenmektedir. Hem yüksek hem de düşük kapasite kümeleri ile en iyi sonuçlar başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n} - 2$ adet ADÜ bulunduğu elde edilmiştir. Üretilen çözüm sayısı arttırıldığında elde edilen çözümlerin optimal çözümden uzaklıkları azalmakta, daha iyi çözümler bulunabilmektedir. Araç atama algoritmaları ortalama olarak birbirlerine yakın bir performans göstermektedir. Tüm durumlar için birinci tip araç atama ile optimal çözümden ortalama %1,24 ikinci tip araç atama ile ise optimal çözümden ortalama %1,21 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. Yüksek kapasite kümesi ile en düşük ortalama fark 12000 çözüm sayısı, II. tip araç atama algoritması ve $p = \sqrt{n} - 2$ başlangıç ADÜ sayısı ile elde edilmiştir. Düşük kapasite kümesi ile ise en düşük ortalama fark 12000 çözüm sayısı ile, II. tip araç atama algoritması ve $p = \sqrt{n} - 2$ başlangıç ADÜ sayısı ile elde edilmiştir. (Tablo 6.9'da hem 6000 hem de 12000 çözüm ile ortalama fark %0,97 olarak görülse de ortalama fark değerinin hassasiyeti artırıldığında 12000 çözüm sayısı ile ortalama farkın daha düşük olduğu görülmektedir.)

CAB verisi kullanılarak da benzer bir analiz gerçekleştirilmiştir. Ancak burada yapılan ön analizde $p = \sqrt{n} + 2$ olduğu durumlarda elde edilen sonuçların $p = \sqrt{n} - 2$ ve $p = \sqrt{n}$ 'e göre optimal çözümden çok daha uzak olduğu görüldüğünden başlangıç ADÜ sayısının sadece $p = \sqrt{n} - 2$ ve $p = \sqrt{n}$ olduğu durumlar ele alınmıştır. CAB verisinde talep noktası sayısı 25'e yükseldiğinden üretilen çözüm sayısı da bu durum göz önünde bulundurularak talep noktası sayısındaki artış ile orantılı olacak şekilde arttırılmıştır. Bu kapsamda 12000 ve 24000 çözümün üretildiği iki ayrı durum ele alınmıştır.

Tablo 6.9: Farklı kapasiteler ve farklı çözüm sayıları ile elde edilen ortalama değerler.

| Kapasite | Çözüm Sayısı | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | $p = \sqrt{n}$ | $p = \sqrt{n} + 2$ |
|----------|--------------|------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Yüksek | 6000 | I | 0,95 | 1,12 | 1,52 |
| | | II | 0,91 | 1,08 | 1,78 |
| | 12000 | I | 0,92 | 1,02 | 1,40 |
| | | II | 0,90 | 0,97 | 1,45 |
| Düşük | 6000 | I | 1,16 | 1,28 | 1,94 |
| | | II | 0,97 | 1,24 | 1,66 |
| | 12000 | I | 1,02 | 1,02 | 1,58 |
| | | II | 0,97 | 1,01 | 1,58 |

Sezgisel algoritma ile 12000 çözüm üretildiği duruma ait sonuçlar Tablo 6.10'da verilmektedir. CAB verisi ile yapılan analizlerde Türkiye verisine kıyasla optimal çözümden daha uzak sonuçlar elde edilebilmiştir. Tablo 6.10'da son iki satırda bulunan ortalama değerler incelendiğinde, başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n} - 2 = \sqrt{25} - 2 = 3$ adet ADÜ bulunduğu durumda sezgisel algoritma ile optimal çözümden I. tip araç atama kuralı ile ortalama %3,88 uzaklıkta II. tip araç atama ile ise ortalama %4,03 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. $p = \sqrt{n}$ durumunda bu değerler sırasıyla %3,69 ile %3,71 olmaktadır. Tablo 6.10'da optimal çözüme en uzak çözüm için fark değeri %7,71, en yakın çözüm için %1,47'dir. Çözüm süresi açısından başlangıç çözümünde daha fazla ADÜ bulunan durumlarda sonuçların daha hızlı elde edildiği görülmektedir.

Tablo 6.10: CAB verisi ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 53 | 7,42 | 13 | 5,23 |
| | | | II | 100 | 7,71 | 14 | 5,79 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 99 | 5,31 | 12 | 5,20 |
| | | | II | 82 | 6,21 | 12 | 5,93 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 35 | 4,98 | 12 | 5,02 |
| | | | II | 63 | 4,76 | 12 | 4,47 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 56 | 3,69 | 13 | 3,49 |
| | | | II | 77 | 3,75 | 13 | 3,38 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 43 | 2,71 | 11 | 3,14 |
| | | | II | 70 | 2,44 | 14 | 2,97 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 73 | 1,56 | 14 | 1,80 |
| | | | II | 56 | 1,86 | 14 | 1,92 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 75 | 1,50 | 12 | 1,91 |
| | | | II | 83 | 1,47 | 14 | 1,52 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 62 | 3,88 | 13 | 3,69 |
| | | | II | 76 | 4,03 | 13 | 3,71 |

Üretilen çözüm sayısı 12000'den 24000'e çıkartıldığında tüm durumlar için ortalama uzaklık değerleri azalmış ve çözüm süresi artmıştır. $p = \sqrt{n} - 2$ olduğu durumda I. tip araç atama için ortalama %3,87 II. tip araç atama için ise optimal çözümden ortalama %3,91 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. $p = \sqrt{n}$ durumunda ise bu değerler %2,69 ile %2,19 olmaktadır. Tablo 6.11'de optimal çözüme en uzak çözüm için fark değeri %7,71 en yakın çözüm için ise %1,47'dir. CAB verisi ile 12000 çözüm üretildiği duruma göre çözüm süreleri artmıştır. Ayrıca 12000 çözüm üretildiği durumdaki gibi başlangıç çözümünde daha fazla ADÜ bulunduğu durumlarda çözüm süresinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 6.11: CAB verisi ile 24000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | | $p = \sqrt{n}$ | |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 126 | 6,95 | 192 | 4,79 |
| | | | II | 128 | 7,35 | 224 | 3,24 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 129 | 6,03 | 214 | 3,29 |
| | | | II | 137 | 6,18 | 246 | 2,16 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 126 | 4,90 | 201 | 2,69 |
| | | | II | 146 | 4,80 | 228 | 2,81 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 137 | 3,58 | 229 | 3,01 |
| | | | II | 124 | 3,56 | 216 | 2,27 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 135 | 2,53 | 231 | 1,95 |
| | | | II | 156 | 2,44 | 255 | 1,86 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 125 | 1,59 | 243 | 1,56 |
| | | | II | 148 | 1,65 | 230 | 1,47 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 136 | 1,50 | 245 | 1,54 |
| | | | II | 154 | 1,42 | 224 | 1,47 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 131 | 3,87 | 222 | 2,69 |
| | | | II | 142 | 3,91 | 232 | 2,19 |

Tablo 6.12’de CAB verisi ile elde edilen sonuçlar özetlenmektedir. Başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n}$ adet ADÜ bulunduğu durumlarda $p = \sqrt{n} - 2$ ’ye göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen çözüm sayısı artırıldığında optimal çözümden uzaklıklar azalmaktadır. Araç atama algoritmaları yine birbirlerine yakın bir performans göstermişlerdir. Tüm durumlar için birinci tip araç atama ile %3,53 ikinci tip araç atama ile ise optimal çözümden ortalama olarak %3,46 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir.

Tablo 6.12: CAB verisi ile farklı çözüm sayıları ile elde edilen ortalama değerler.

| Çözüm Sayısı | Araç Atama | $p = \sqrt{n} - 2$ | $p = \sqrt{n}$ |
|--------------|------------|--------------------|----------------|
| 12000 | I | 3,88 | 3,69 |
| | II | 4,03 | 3,71 |
| 24000 | I | 3,87 | 2,69 |
| | II | 3,91 | 2,19 |

CAB verisi ile elde edilen sonuçlarda optimal çözümden uzaklık değerleri Türkiye verisine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Optimal çözümler ile sezgisel algoritma çözümleri kıyaslandığında ADÜ yerlerinin çok benzer olduğu görülmektedir. Yani uzaklık değerlerinin yüksek çıkmasında en büyük etkiyi ADÜ'ler arasında hizmet veren araç tipi ve sayılarındaki fark meydana getirmektedir. Bu duruma neden olan etken de Türkiye'de iller arasında taşınan kargo miktarının CAB verisine göre daha dengeli olmasıdır.

Türkiye verisi ve CAB verisi ile elde edilen sonuçları araç atama algoritmalarının performansı açısından kıyaslayacak olursak Tablo 6.9'da da görüleceği gibi Türkiye verisinde elde edilen ortalama değerlere bakıldığında 12 durumun dokuz tanesinde II. tip araç atama algoritması iki tanesinde ise I. tip araç atama algoritması daha iyi sonuç vermektedir. Bir durumda ise ortalama değer olarak aynı performansı göstermektedirler. CAB verisinde ise dört durumun üç tanesinde I. tip bir tanesinde ise II. tip araç atama algoritması daha iyi sonuçlar vermektedir.

6.3 İstatistiksel Analiz

Problem parametrelerinin geliştirilen sezgisel algoritma üzerine olan etkilerini incelemek için istatistiki bir deneysel çalışma düzenlenmiştir. Bu çalışma ile başlangıç çözümünde bulunan ADÜ sayısının, üretilen çözüm sayısının, belirlenen ADÜ kapasitelerinin ve araç atama algoritmasının tipinin sezgisel algoritma ile elde edilen çözümlerin kalitesine ve çözüm süresine olan etkisi analiz edilmektedir. Deneysel çalışma için bir önceki bölümde bahsedilen Türkiye veri kümesi ile EK 2'de verilen tablolardaki her bir koşuturum için elde edilmiş olan beş tekrara ait sonuçlar kullanılmıştır. Analiz, Design Ease 7.1.5 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Programın kullanılması ile elde edilen ve istatistiksel hipotezin sınanması için anlamlılık düzeyini gösteren kritik p -değerleri Tablo 6.13'de görülmektedir. Yapılan testler sırasında kullanılan hipotezler şöyledir.

H_0 = Faktör istatistiksel olarak %95 güven düzeyinde anlamlı değildir.

$H_{alternatif}$ = Faktör istatistiksel olarak %95 güven düzeyinde anlamlıdır.

Tablo 6.13’de ilk sütun ele alınan faktörleri yani problem parametrelerini göstermektedir. İkinci ve üçüncü sütunlarda ilgili parametreler için sezgisel algoritma ile elde edilen çözümün optimal çözümden farkı ve sezgisel algoritmanın çözüm süresi için elde edilmiş olan p -değerleri yer almaktadır. Tabloda faktörlere karşılık gelen p -değerleri 0,05’ten küçük ise boş hipotez reddedilmekte ve alternatif hipotez doğrulanmaktadır. Diğer durumda ise boş hipotez reddedilememektedir. Tablo 6.13’de koyu olarak yazılan p -değerleri boş hipotezin doğrulandığı yani ilgili faktörün fark veya çözüm süresi üzerine bir etkisinin olmadığı durumları göstermektedir.

Tablo 6.13: Faktörlere ait p -değerleri.

| Faktörler | p -değerleri | |
|---|----------------|---------------|
| | Fark | Çözüm Süresi |
| Başlangıç ADÜ Sayısı ($\sqrt{n} - 2, \sqrt{n}, \sqrt{n} + 2$) | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Çözüm Sayısı (6000,12000) | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Kapasite (Düşük, Yüksek) | 0,0021 | 0,6048 |
| Araç Atama (I ve II) | 0,3829 | 0,0001 |
| Sabit ADÜ Açma Maliyeti (60000-120000) | < 0,0001 | 0,0478 |

Bu bilgiler ışığında tablo analiz edilecek olursa optimal çözümden uzaklık yani fark açısından araç atama algoritması dışındaki tüm faktörlerin p -değerleri 0,05’den küçüktür. Yani başlangıç çözümünde bulunan ADÜ sayısı, üretilen çözüm sayısı, ADÜ kapasiteleri ve sabit ADÜ açma maliyetleri elde edilen çözümün optimal çözümden uzaklığı üzerine etkili olan faktörlerdir. Araç atama algoritmasının ise fark değeri üzerine etkisi bulunmamakta yani iki araç atama algoritması da birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir.

Çözüm süresini başlangıç çözümünde bulunan ADÜ sayısının, üretilen çözüm sayısının, araç atama algoritmasının ve sabit ADÜ açma maliyeti faktörlerinin hepsinin etkilediği, kapasitenin ise çözüm süresi üzerine herhangi bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir.

6.4 Alt Sınır

Sezgisel algoritmanın performansını büyük ölçekli verilerde ölçebilmek için bir alt sınır önerilmesine karar verilmiştir. Alt sınır bulma yöntemi olarak matematiksel modelde yer alan tamsayılı araç sayısı değişkenlerinin (z_{ij}^v) tamsayı olma özelliklerinin gevşetilmesi ile bir çözüm elde edilmektedir. Elde edilen gevşetilmiş çözümün amaç fonksiyonu değeri optimal amaç fonksiyonu değeri için bir alt sınır oluşturmaktadır. Bu yöntemle elde edilen alt sınırın kalitesini ölçmek için optimal çözümün bulunabildiği 16 talep noktası içeren Türkiye verisi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler Tablo 6.14 ve 6.15’de sunulmaktadır.

Tablo 6.14 ve 6.15’de farklı kapasite kümeleri ve farklı maliyet değerleri ile elde edilen optimal ve gevşetilmiş çözümlerin amaç fonksiyonu değerleri ve bu çözümleri elde etmek için CPLEX tarafından gerekli CPU zamanları sunulmaktadır. Son sütunlarda gevşetilmiş çözümün amaç fonksiyonu değerlerinin optimal amaç fonksiyonu değerlerinden olan uzaklığı yüzde olarak yer almaktadır.

Yüksek kapasite kümesi ile yapılan analizlerde (z_{ij}^v) değişkeninin tamsayı olma özelliğinin gevşetilmesi ile yedi örnek için optimal çözümden ortalama % 0,63 uzaklıkta alt sınırlar elde edilmiştir. Sabit maliyetlerin daha yüksek olduğu örneklerde elde edilen alt sınırların optimal çözümden olan uzaklıklarının daha düşük olduğu görülmektedir. Düşük kapasite kümesi ile gerçekleştirilen analizin sonuçları da benzerlik göstermektedir. Sabit maliyet değerleri arttıkça alt sınırların fark değerleri azalmaktadır. Her iki kapasite kümesi ile test edilen toplam on dört örnekte alt sınırın ortalama uzaklığı %0,64’dür. Ortalama fark değerleri göz önüne alındığında elde edilen alt sınırın kalitesinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 6.14: Yüksek kapasite kümesi ile alt sınırın optimal çözümlerden uzaklığı.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Gevşetilmiş Çözüm | | Fark (%) |
|-----------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | 557093 | 40 | 1,01 |
| 70000 | 602800 | 4195 | 597093 | 19 | 0,95 |
| 80000 | 642800 | 4189 | 637093 | 20 | 0,89 |
| 90000 | 682800 | 3015 | 677093 | 40 | 0,84 |
| 100000 | 721156 | 409 | 717093 | 16 | 0,56 |
| 110000 | 743961 | 18 | 743251 | 13 | 0,10 |
| 120000 | 763961 | 9 | 763251 | 9 | 0,09 |
| ORTALAMA | - | 2067 | - | 22 | 0,63 |

Tablo 6.15: Düşük kapasite kümesi ile alt sınırın optimal çözümlerden uzaklığı.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Gevşetilmiş Çözüm | | Fark (%) |
|-----------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | 557242 | 24 | 1,03 |
| 70000 | 603052 | 1639 | 597242 | 17 | 0,96 |
| 80000 | 643052 | 906 | 637242 | 27 | 0,90 |
| 90000 | 683052 | 998 | 677242 | 18 | 0,85 |
| 100000 | 721656 | 347 | 717242 | 32 | 0,61 |
| 110000 | 744361 | 14 | 743651 | 9 | 0,10 |
| 120000 | 764361 | 15 | 763651 | 4 | 0,09 |
| ORTALAMA | - | 752 | - | 19 | 0,65 |

7 PROBLEMİN TÜRKİYE İÇİN UYGULAMASI VE DUYARLILIK ANALİZLERİ

Bir önceki bölümde sezgisel algoritmanın performansını test edebilmek için 16 talep noktası içeren Türkiye verisi ve 25 talep noktası içeren CAB verisi ile yapılan analizler sunulmuştur. Bu bölümde ise 81 talep noktası içeren tüm Türkiye verisi ile elde edilmiş olan sonuçlar incelenmektedir.

Başlangıç çözümünde bulunacak ADÜ sayısı ve üretilecek çözüm sayısını belirlemek için gerçekleştirilen ön analizler sonucu en iyi çözümlerin başlangıç çözümünde $p = \sqrt{n} = 9$ adet ADÜ bulunduğu durumda elde edildiği ve üretilecek çözüm sayısı açısından da 75.000 çözümden fazla çözüm üretmenin amaç fonksiyon değeri üzerinde belirgin bir iyileşmeye neden olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu kısımda sunulan sonuçlarda sezgisel algoritma için bu parametre değerleri kullanılmaktadır.

Duyarlılık analizi kapsamında, ADÜ kapasiteleri, sabit ADÜ açma maliyeti, sahip olunan araç sayıları ve araç kiralama maliyetlerindeki değişikliklerden sonuçların ne şekilde etkilendiği analiz edilmektedir. ADÜ'ler için düşük ve yüksek olmak üzere iki kapasite kümesi ele alınmıştır. Her bir kapasite kümesi için küçük ve büyük kapasiteli ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları Tablo 7.1'de sunulmaktadır.

Tablo 7.1: ADÜ'lerin elleçleyebilecekleri araç sayıları.

| | Düşük | | Yüksek | |
|---------------|-------|-------|--------|-------|
| | Küçük | Büyük | Küçük | Büyük |
| Uçak | 6 | 12 | 10 | 20 |
| Tır | 35 | 70 | 50 | 100 |
| Kamyon | 60 | 120 | 75 | 150 |

Öncelikle ADÜ kapasitelerinin yüksek ve düşük olduğu durumlarda sabit ADÜ açma maliyetleri 10.000 TL'lik artışlar ile 60.000 TL'den 120.000 TL'ye kadar

arttırılmıştır. Bu durumlarda hava ve kara ADÜ'lerinin hangi illere hangi kapasitelerde kuruldukları, sahip olunan hangi tip araçtan kaç adet kullanıldığı ve hangi tip araçtan kaç adet kiralandığı bilgileri ile çözüm süresi ve amaç fonksiyonu değerleri Tablo 7.2'de verilmektedir. Bu tabloda kurulmuş olan ADÜ'lerden koyu yazı karakteri ile gösterilenler bu noktaya büyük kapasiteli ADÜ kurulduğunu belirtmektedir. Araç sayılarından parantez içerisinde olanlar kiralanılan araç sayılarını diğerleri ise sahip olunan araçlardan kaç tanesinin kullanıldığını göstermektedir. Tablo 7.2'deki örneklerde 10 adet uçak, 170 adet tır ve 200 adet kamyonaya sahip olduğu varsayılmaktadır.

Tablo 7.2: ADÜ kapasitelerinin yüksek olduğu durumda sabit ADÜ açma maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi.

| Sabit Maliyet | Amaç Fonk. | Çözüm Süresi (dk) | ADÜ Sayısı | Hava ADÜ'leri | Kara ADÜ'leri | Uçak Sayısı | Tır Sayısı | Kamyon Sayısı |
|---------------|------------|-------------------|------------|-----------------------|----------------------------------|-------------|------------|---------------|
| 60000 | 1535778 | 15,8 | 9 | 6, 21, 28, 33, 34, 45 | 6, 7, 16, 21, 28, 33, 34, 42, 45 | 10 | 170 | 153 |
| 70000 | 1630568 | 15,2 | 9 | 1, 6, 21, 28, 34, 35 | 1, 6, 7, 16, 21, 28, 34, 35, 70 | 10 | 170 | 200 (13) |
| 80000 | 1697983 | 15,9 | 6 | 1, 6, 12, 34 | 1, 6, 12, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 160 |
| 90000 | 1799100 | 15,8 | 7 | 1, 6, 12, 34 | 1, 6, 7, 12, 16, 34, 35 | 10 | 170 | 172 |
| 100000 | 1854388 | 15,1 | 6 | 6, 34, 35, 46 | 6, 16, 34, 35, 46, 69 | 10 | 170 | 149 |
| 110000 | 1967359 | 16,5 | 7 | 6, 34, 46, 49 | 6, 7, 16, 34, 35, 46, 49 | 10 | 170 | 168 |
| 120000 | 1966114 | 16,6 | 6 | 1, 6, 23, 34 | 1, 6, 23, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 153 |

ADÜ kapasitelerinin yüksek olduğu durumda sabit maliyetteki değişimin sonuçlar üzerine olan etkileri incelendiğinde, sabit ADÜ açma maliyetleri arttıkça açılan ADÜ sayısının azaldığı görülmektedir. Sabit maliyet 70.000 TL'den 80.000 TL'ye yükseltildiğinde açılan ADÜ sayısı dokuzdan altıya düşmektedir. Sabit maliyetin 60.000 ve 70.000 TL olduğu durumlarda altı adet hava ve dokuz adet kara ADÜ'sü kurulmaktadır. Bu iki örnekte kurulan ADÜ'lerin yerleri de benzerlik

göstermektedir. Her ikisinde de Ankara (6), Diyarbakır (21), Giresun (28) ve İstanbul'a (34) hava ADÜ'sü ve Ankara (6), Antalya (7), Bursa (16), Diyarbakır (21), Giresun (28) ve İstanbul'a (34) kara ADÜ'sü kurulmaktadır. ADÜ açma maliyetleri 80.000 TL ve üzerinde olduğunda ADÜ sayısı altı ile yedi arasında değişmektedir. ADÜ'lerin kuruldukları yerler genel olarak benzerlik göstermektedir. Ankara (6) ve İstanbul (34) illerine tüm örneklerde hava ve kara ADÜ'sü kurulmaktadır. Sonuçlar yüksek ADÜ kapasiteleri ile elde edildiğinden büyük kapasiteli ADÜ kurulmasına hiç bir örnekte ihtiyaç oluşmadığı ve kurulan tüm ADÜ'lerin küçük kapasiteli olduğu görülmektedir.

Tüm örneklerde sahip olunan uçak ve tırların hepsi kullanılmaktadır. ADÜ açma maliyetinin 70.000 TL olduğu örnekte ise sahip olunan araçlar yetmemekte ve 13 adet kamyon kiralanmaktadır. Bu örnek yüksek kapasiteli çözümler içerisinde en fazla ADÜ kurulan örneklerden biridir. ADÜ sayısının artması ile ADÜ'ler arasında hizmet verecek daha fazla araca ihtiyaç duyulması beklenen bir durumdur. Bunun dışındaki örneklerde ise sahip olunan kamyonların hepsinin kullanılmasına gerek kalmamaktadır. Her bir çözümde sezgisel algoritma için gerekli süre yaklaşık olarak 15 dakikadır.

Tablo 7.3'de ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda sabit ADÜ açma maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisi sunulmaktadır.

Tablo 7.3: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda sabit ADÜ açma maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi.

| Sabit Maliyet | Amaç Fonk. | Çözüm Süresi (dk) | ADÜ Sayısı | Hava ADÜ'leri | Kara ADÜ'leri | Uçak Sayısı | Tır Sayısı | Kamyon Sayısı |
|---------------|------------|-------------------|------------|-----------------------|---------------------------------|-------------|------------|---------------|
| 60000 | 1541002 | 13,9 | 8 | 6, 12, 33, 34, 35, 42 | 6, 12, 16, 33, 34, 35, 42, 52 | 10 | 172 | 173 |
| 70000 | 1644357 | 15,1 | 9 | 1, 6, 21, 24, 34, 35 | 1, 6, 7, 16, 21, 24, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 200 (12) |
| 80000 | 1734588 | 15,0 | 7 | 1, 6, 25, 34 | 1, 6, 16, 25, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 179 |
| 90000 | 1810134 | 14,4 | 6 | 1, 6, 34, 69 | 1, 6, 34, 35, 42, 69 | 10 | 170 | 153 |
| 100000 | 1869100 | 15,0 | 7 | 1, 6, 12, 34 | 1, 6, 7, 12, 16, 34, 35 | 10 | 170 | 172 |
| 110000 | 1944588 | 14,8 | 7 | 1, 6, 25, 34 | 1, 6, 16, 25, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 179 |
| 120000 | 2002206 | 13,1 | 6 | 6, 13, 34, 46 | 6, 13, 16, 34, 35, 46 | 10 | 170 | 159 |

ADÜ'lerin kapasitesinin düşük olduğu durum yüksek kapasiteli durum ile kıyaslandığında, kapasitenin azalmasının kurulan ADÜ'lerin sayısı ve yerleri üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir. Kapasitelerin yüksek olduğu durumdaki gibi düşük olduğu durumda da sabit ADÜ açma maliyetinin artması ile kurulan ADÜ sayıları azalmaktadır. ADÜ'lerin yerleri açısından da yine yüksek kapasiteli örneklem grubundaki gibi Ankara (6) ve İstanbul (34) illerine her çözümde hem hava hem de kara ADÜ'sü kurulmaktadır. Ayrıca bu örneklem kümesinde İzmir (35)'e de tüm örneklerde kara ADÜ'sü kurulduğu gözlemlenmektedir. Kapasitelerin yüksek olduğu Tablo 7.1'deki çözümlerde sabit maliyetin 60.000 TL olduğu durumda İzmir'e kara ADÜ'sü kurulmamış ancak diğer altı sabit maliyet değeri ile elde edilen çözümlerde kurulmuştur. Yani Ankara ve İstanbul gibi İzmir de ADÜ kurmak için tercih edilen bir şehir olarak karşımıza çıkmaktadır. Sabit ADÜ açma maliyetinin 120.000 TL olduğu durumda kurulan kara ADÜ'lerinden bir tanesi büyük kapasitelidir. Bunun sebebi hem ADÜ kapasitelerinin düşük olması hem de bu örnekte kurulan ADÜ sayısının az olmasıdır.

Düşük ve yüksek kapasiteli çözümler kullanılan araç sayıları açısından da benzerlik göstermektedir. Düşük ADÜ kapasiteli çözümlerde de tüm örneklerde sahip olunan uçak ve tırların hepsi kullanılmakta ve bir örnek dışında sahip olunan kamyonların hepsini kullanılmasına gerek kalmamaktadır. Sabit maliyetin 70.000 TL olduğu durumda sahip olunan araçlar yetersiz kalmakta ve kamyon kiralama ihtiyacı duyulmaktadır. Bu örnek düşük kapasiteli çözümler içerisinde en fazla ADÜ kurulan örnektir. ADÜ sayısının artması ile ADÜ'ler arasında hizmet verecek daha fazla araca ihtiyaç duyulması beklenen bir durumdur.

Düşük kapasite ile yapılan analizlerde çözümler yaklaşık olarak 15 dakika içerisinde elde edilebilmektedir. Bu durum ADÜ kapasitelerinin değişmesinin sezgisel algoritmanın çözüm süresini etkilemediğini göstermektedir.

Sahip olunan araç sayılarındaki ve araç kiralama maliyetlerindeki değişikliklerin sonuçlar üzerine olan etkilerini analiz edebilmek için, düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli örnekten yola çıkarak Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 oluşturulmuştur.

Tablo 7.4'de ADÜ'lerin kapasitesinin düşük olduğu durumda sahip olunan araç sayısındaki değişimin sonuçlar üzerine olan etkileri analiz edilmektedir. Sahip olunan araç sayısının sonuçlara olan etkisinin incelenmesi için sahip olunan uçak, tır ve kamyon sayıları ayrı ayrı artırılıp azaltılarak farklı örnekler oluşturulmuştur. ADÜ sayısı, kurulmuş olan hava ve kara ADÜ'lerinin yerleri ve kapasiteleri, sahip olunan hangi tip araçtan kaç adet kullanıldığı ve hangi tip araçtan kaç adet kiralandığı bilgileri ile çözüm süresi ve amaç fonksiyonu değerleri bilgileri tabloda verilmektedir. Koyu yazı karakteri ile belirtilmiş olan ADÜ'ler büyük kapasiteli ADÜ'leri, parantez içerisindeki araç sayıları da kiralanmış olan araç sayısını göstermektedir. Tablo 7.4'deki 10 adet uçak 170 adet tır ve 200 adet kamyonla sahip olunan örnek Tablo 7.3'de sabit ADÜ açma maliyetinin 90.000 TL olduğu örnek ile aynıdır.

Tablo 7.4: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda sahip olunan araç sayısında yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi.

| Uçak-Tır-Kamyon | Amaç Fonk. | Çözüm Süresi (dk) | ADÜ Sayısı | Hava ADÜ'leri | Kara ADÜ'leri | Uçak Sayısı | Tır Sayısı | Kamyon Sayısı |
|-----------------|------------|-------------------|------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|------------|---------------|
| 4-75-85 | 2006569 | 15,2 | 7 | 1, 6, 34 | 1, 6, 7, 12, 16, 34, 35 | 4 | 75 (181) | 85(15) |
| 4-100-115 | 1968676 | 14,0 | 7 | 1, 6, 34 | 1, 6, 7, 12, 16, 34, 35 | 4 | 100(156) | 115 |
| 6-100-115 | 1979467 | 15,1 | 7 | 1, 6, 23, 34 | 1, 6, 7, 16, 23, 34, 35 | 6 | 100(122) | 115(15) |
| 6-130-150 | 1879501 | 15,1 | 6 | 6, 29, 34, 80 | 6, 29, 34, 35, 42, 80 | 6 | 130(66) | 150(11) |
| 8-130-150 | 1861590 | 17,0 | 7 | 6, 12, 34 | 6, 7, 12, 16, 34, 35, 80 | 8 | 130(67) | 150 |
| 8-170-200 | 1807304 | 14,0 | 7 | 6, 34, 46 | 6, 16, 34, 35, 42, 46, 69 | 8 | 170 | 197 |
| 10-170-200 | 1810134 | 14,4 | 6 | 1, 6, 34, 69 | 1, 6, 34, 35, 42, 69 | 10 | 170 | 153 |
| 10-215-250 | 1759296 | 15,0 | 8 | 6, 28, 33, 34, 72 | 6, 7, 16, 28, 33, 34, 35, 72 | 10 | 215 | 113 |
| 12-215-250 | 1768972 | 14,2 | 7 | 6, 25, 34, 80 | 6, 7, 16, 25, 34, 35, 80 | 12 | 215 | 77 |
| 12-270-315 | 1733042 | 15,8 | 8 | 6, 28, 33, 34, 72 | 6, 7, 16, 28, 33, 34, 35, 72 | 12 | 270 | 5 |
| 14-270-315 | 1768850 | 18,4 | 9 | 6, 13, 16, 29, 34, 35, 80 | 6, 7, 13, 16, 29, 34, 35, 42, 80 | 14 | 247 | 31 |
| 14-340-395 | 1742695 | 16,2 | 8 | 6, 34, 35, 46, 56, 61 | 6, 7, 16, 34, 35, 46, 56, 61 | 14 | 234 | 24 |

Tablo 7.4'de sunulan örneklem kümesinde kurulan ADÜ sayıları ve ADÜ'lerin yerleri Tablo 7.2 ve 7.3'de sunulan iki örneklem kümesi ile benzerlik göstermektedir. Sahip olunan uçak sayısının artması kurulan hava ADÜ'sü sayısının da artmasına sebep olmaktadır. Örneklerin hepsinde Ankara (6) ve İstanbul (34) illerine hem hava hem kara ADÜ'sü İzmir'e (35) ise sadece kara ADÜ'sü kurulduğu görülmektedir.

Bütün örneklerde sahip olunan tüm uçaklar kullanılmaktadır. Son iki örnek haricindeki örneklerde ise sahip olunan tüm tırlar kullanılmaktadır. Sahip olunan kamyon sayısı 200'den fazla olduğu zaman sahip olunan kamyonların bir kısmının kullanılmasına gerek kalmamaktadır. Kiralanan araç sayılarına bakıldığında ise tır sayısının 170'den az olduğu durumlarda tır sayısının yetersiz kaldığı, bu rakamdan daha az sayıda tıra sahip olduğunda çok fazla tır kiralınmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Araç kiralınmasına ihtiyaç duyulmayan 8 uçak 170 tır ve 200 kamyonu sahip olunan örnekten itibaren çözümlerin amaç fonksiyonu değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. En düşük üç amaç fonksiyonuna ait çözümde sekiz adet ADÜ bulunmaktadır. Bu çözümlerden iki tanesinde kurulan ADÜ'lerin yerleri de aynıdır: Ankara (6), Antalya (7), Bursa (16), Giresun (28), Mersin (33), İstanbul (34), İzmir (35) ve Batman (72). Ankara, İstanbul ve İzmir Türkiye'de en fazla kargo yoğunluğuna sahip olan iller olduğundan sıklıkla ADÜ seçilmeleri beklenen bir durumdur. ADÜ kurmak için seçilmiş olan diğer illerin coğrafi konumları açısından uygun oldukları düşünülmektedir.

Tablo 7.5'de ADÜ'lerin kapasitesinin düşük olduğu durumda araç kiralama maliyetlerindeki değişimin sonuçlar üzerine olan etkileri analiz edilmektedir. Bu veri kümesi araç kiralama maliyetleri her örnek için yaklaşık olarak %20 arttırılarak oluşturulmuş ve en düşük maliyetli örneğin sahip olunan araçları işletme maliyetlerinden daha düşük olmamasına dikkat edilmiştir. Kiralama maliyetlerinin tırlar için 1200 TL, kamyonlar için 1000 TL olduğu örnek Tablo 7.3'deki sabit ADÜ açma maliyetlerinin 90.000 TL olduğu durumdur. ADÜ sayıları, kurulmuş olan hava ve kara ADÜ'lerinin yerleri ve kapasiteleri, sahip olunan hangi tip araçtan kaç adet kullanıldığı ve hangi tip araçtan kaç adet kiralandığı bilgileri ile çözüm süresi ve amaç fonksiyonu değerleri bilgileri tabloda verilmektedir. Yine, koyu yazı karakteri ile belirtilmiş olan ADÜ'ler büyük kapasiteli ADÜ'leri ve parantez içerisindeki araç sayıları da kiralanmış olan araç sayısını göstermektedir.

Tablo 7.5: ADÜ kapasitelerinin düşük olduğu durumda araç kiralama maliyetlerinde yapılan değişikliklerin sonuçlara olan etkisinin incelenmesi.

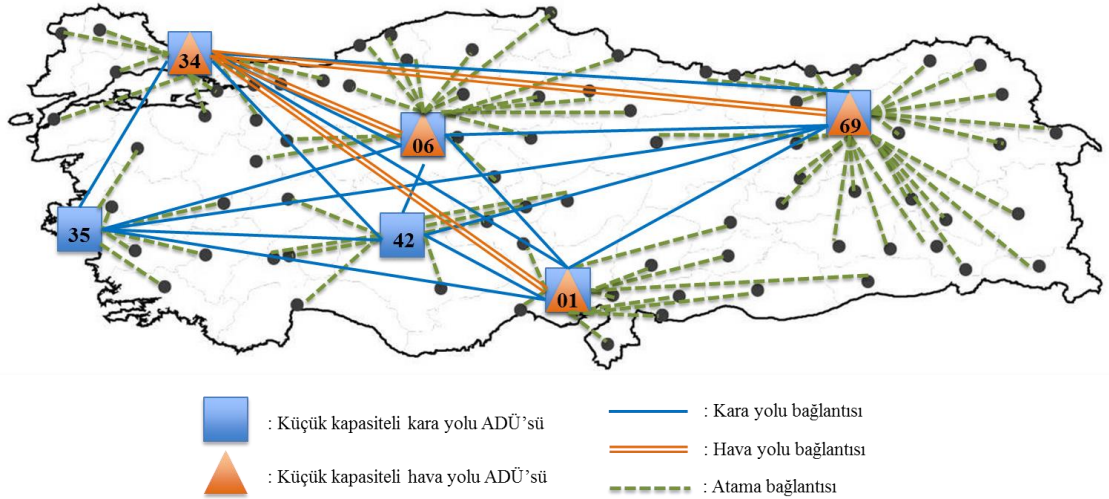
| Kiralama Maliyetleri Tır-Kamyon | Amaç Fonk. | Çözüm Süresi (dk) | ADÜ Sayısı | Hava ADÜ'leri | Kara ADÜ'leri | Uçak Sayısı | Tır Sayısı | Kamyon Sayısı |
|---------------------------------|------------|-------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------|------------|---------------|
| 300-250 | 1777041 | 16,0 | 9 | 1, 6, 21, 28, 34, 35 | 1, 6, 7, 16, 21, 28, 34, 35, 42 | 10 | 170(12) | 200 |
| 400-300 | 1805339 | 13,7 | 8 | 6, 21, 33, 34, 35, 58 | 6, 7, 16, 21, 33, 34, 35, 58 | 10 | 170 | 198 |
| 500-400 | 1798645 | 14,6 | 9 | 1, 6, 12, 34, 35, 52 | 1, 6, 7, 12, 16, 34, 35, 42, 52 | 10 | 170(13) | 200 |
| 600-500 | 1801794 | 15,3 | 9 | 1, 6, 21, 34, 35, 61 | 1, 6, 7, 16, 21, 34, 35, 42, 61 | 10 | 170(10) | 200 |
| 700-600 | 1815809 | 15,0 | 9 | 6, 21, 27, 34, 35, 60 | 6, 16, 21, 27, 32, 33, 34, 35, 60 | 10 | 170 | 200(9) |
| 900-700 | 1793190 | 17,8 | 7 | 1, 6, 12, 34 | 1, 6, 12, 15, 16, 34, 35 | 10 | 170 | 168 |
| 1000-900 | 1805393 | 13,6 | 9 | 1, 6, 21, 29, 34, 35 | 1, 6, 7, 16, 21, 29, 34, 35, 42 | 10 | 170 | 200(13) |
| 1200-1000 | 1810134 | 14,4 | 6 | 1, 6, 34, 69 | 1, 6, 34, 35, 42, 69 | 10 | 170 | 153 |
| 1500-1200 | 1783703 | 15,3 | 6 | 6, 25, 34, 46 | 6, 16, 25, 34, 35, 46 | 10 | 170 | 158 |
| 1800-1500 | 1772518 | 16,1 | 8 | 6, 21, 33, 34, 60 | 6, 7, 16, 21, 33, 34, 35, 60 | 10 | 170 | 193 |

Kullanılan araçlar incelendiğinde sahip olunan araçların genellikle yeterli olduğu, 10 örnekten beş tanesinde araç kiralama ihtiyacı duyulduğu ve kiralanan araç sayısının da fazla olmadığı görülmektedir. ADÜ yerleri açısından da diğer örneklerde olduğu gibi bu tabloda da tüm durumlarda Ankara (6) ve İstanbul (34) illerine hem hava hem kara ADÜ'sü, İzmir'e (35) ise kara ADÜ'sü kurulduğu görülmektedir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde, önerilen model ile Türkiye'de faaliyet gösteren kargo firmalarının transfer merkezlerinin sayısından daha az transfer merkezi açmaya ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Transfer merkezlerinin yerleri illerin taleplerine ve coğrafi konumlarına bağlı olarak değişmektedir. Sonuçlarda genel olarak her bölgede transfer merkezi bulunduğu görülmektedir. Talep noktalarının ADÜ'lere olan atanmaları incelendiğinde kargo firmalarının da tercih ettikleri gibi talep noktalarının

çoğunlukla kendilerine en yakın olan ADÜ'lere atandığı görülmektedir. ADÜ ağında kullanılan araçlar incelendiğinde ise genelde ADÜ'ler arasında karşılıklı olarak aynı araçların çalıştığı gözlemlenmektedir. Tüm bu sonuçlar ikinci bölümde sunulan gerçek hayat gözlemleri kısmında verilen bilgiler ile örtüşmektedir. Bu nedenle önerilen modelin gerçekçi sonuçlar ürettiğini söylemek mümkündür.

Tablo 7.3'de verilen düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli örneğin sonucunun Türkiye haritası üzerinde gösterimi Şekil 7.1'de sunulmaktadır. Şekil üzerinde hava ve kara ADÜ'lerinin yerleri, talep noktalarının hangi ADÜ'lere atandığı ve kurulan uçak bağlantıları ile bu bağlantılar üzerinde hizmet veren uçak sayılarına ait bilgiler bulunmaktadır. Şekil üzerinde yer alan kareler kurulan kara ADÜ'lerini üçgenler ise hava ADÜ'lerini temsil etmektedir. ADÜ'lerin içerisinde yer alan numaralar ilgili ilin plaka kodudur. Kesikli çizgi ile gösterilen bağlantılar atama bağlantılarını, iki çizgi ile gösterilenler ise hava ADÜ'leri arasında kurulan hava yolu bağlantılarını göstermektedir. Kurulan ADÜ ağında hava ve kara yolunda hizmet veren araçlara ait bilgiler ise Tablo 7.6'da verilmektedir.



Tablo 7.6: Düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli örnekte ADÜ'ler arasında hizmet veren araçların sayıları.

| İl Kodları | 1 | | | 6 | | | 34 | | | 35 | | 42 | | 69 | | |
|------------|---|----|----|---|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | U | T | K | U | T | K | U | T | K | T | K | T | K | U | T | K |
| 1 | - | - | - | - | 12 | - | - | 17 | - | - | 15 | - | 13 | - | 12 | - |
| 6 | - | 12 | - | - | - | - | 2 | - | 2 | 9 | - | - | 13 | - | 12 | 1 |
| 34 | 2 | - | 4 | 2 | - | 5 | - | - | - | 13 | 1 | 12 | - | 2 | - | 4 |
| 35 | - | 6 | 5 | - | 9 | - | - | 12 | 1 | - | - | - | 10 | - | 9 | - |
| 42 | - | - | 13 | - | - | 13 | - | 11 | - | - | 10 | - | - | - | - | 13 |
| 69 | - | 12 | - | - | 12 | - | 2 | - | 2 | - | 15 | - | 13 | - | - | - |

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi elde edilen bu çözümde altı adet kara ve dört adet hava ADÜ'sü kurulmuştur. Kara ADÜ'leri Adana (1), Ankara (6), İstanbul (34), İzmir (35), Konya (42) ve Bayburt (69) illerine, hava ADÜ'leri ise Adana (1), Ankara (6), İstanbul (34) ve Bayburt (69) illerine kurulmuştur. İstanbul, Ankara ve İzmir Türkiye'de en fazla kargo yoğunluğuna sahip olan iller olduğundan bu illere ADÜ kurulması beklenen bir durumdur. Bölüm 2'de verilmiş olan Tablo 2.1'den de görüleceği üzere Adana ve Konya üç kargo firması tarafından da ADÜ kurmak için tercih edilen iller arasındadır. Çözümde Türkiye'nin doğu kısmında sadece bir adet ADÜ kurulduğu görülmektedir. Bunun nedeni doğuda kargo yoğunluğunun Türkiye'nin orta ve batı bölgelere kıyasla daha az olmasıdır. Gerçek hayatta Bayburt ADÜ kurmak için tercih edilmese de hem Karaden Bölgesi'nin doğusunda hem de Doğu Anadolu Bölgesi'nde oluşan talebi toplayabilmek için coğrafi açıdan uygun bir konumda bulunmaktadır. Genel olarak talep noktalarının kendilerine en yakın olan ADÜ'lere atandığı görülmektedir.

Kurulan tüm hava ADÜ'leri arasında uçak bağlantısı bulunmamaktadır. Uçaklar sadece İstanbul-Ankara, İstanbul-Adana ve İstanbul-Bayburt arasında hizmet vermektedir. Arasında en fazla kargo taşınan iki il İstanbul ve Ankara olduğundan bu ikili arasında hava yolu kullanılması beklenen bir durumdur. Hem İstanbul en fazla talebe sahip olan il olduğundan hem de İstanbul, Adana ve Bayburt'a uzak olduğundan İstanbul-Adana ve İstanbul-Bayburt bağlantılarında hava yolu kullanımı tercih edildiği görülmektedir.

Bu örnek çözümde, tüm kara ADÜ'lerinin arasında direkt bağlantı bulunmaktadır. İzmir-Ankara, Konya-Ankara, Adana-Ankara, Konya-İzmir, Adana-Konya, Bayburt-Konya ve Bayburt-Adana bağlantıları arasında karşılıklı olarak aynı tip ve sayıda araçlar hizmet vermektedir. Bu durum gerçek hayatta kargo firmalarının tercih ettiği bir durumdur. Örneğin A şehrindeki ADÜ'den B şehrindeki ADÜ'ye üç tır gönderildiyse ertesi gün o üç tır tam dolu olmasa ya da boş da olsa bile A şehrine doğru hareket ettirilmektedir. Firmalar ertesi günü planlayabilmek ve araç kiralamak zorunda kalmamak için araçları ADÜ'ler arasında karşılıklı olarak göndermeyi tercih etmektedir. Bu nedenle, tasarlanan ADÜ ağında karşılıklı olarak aynı araçların çalışması uygulama kolaylığı açısından da istenen bir durumdur. Bu örnek üzerinde alınan sonuçlara bakıldığında da önerilen modelin gerçekçi sonuçlar ürettiğini söylemek mümkündür.

Şekil üzerinde incelenen düşük ADÜ kapasiteli ve 90.000 TL sabit maliyetli bu çözümün amaç fonksiyonu değeri 1.810.134'dür. Bu sezgisel çözümün kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak için çözümün alt sınırdan olan uzaklığı hesaplanmıştır. Alt sınır olarak Bölüm 6.4'te bahsedildiği gibi araç sayısı değişkenlerinin (z_{ij}^v) tamsayı olma özelliklerinin matematiksel modelde gevşetilmesi ile bir amaç fonksiyonu değeri elde edilmiştir. Gevşetilmiş amaç fonksiyonu değeri bu örnek için 1.645.150 olarak belirlenmiştir. Gevşetilmiş çözümü elde etmek için CPLEX tarafından gerekli CPU zamanı 18.011 dakikadır. Bu değerlere göre bu örnekte bulunan sezgisel çözümün alt sınırdan olan uzaklığı %10,03 olarak hesaplanmıştır. Alt sınırın optimal çözümden olan uzaklığı da göz önüne alındığında bulunan bu çözümün optimalden olan uzaklığının en fazla %9 olduğu tahmin edilmektedir.

8 SONUÇLAR

Bu çalışmada, kargo firmaları tarafından gerçekleştirilen küçük paket ve dosya taşımacılığı ele alınmıştır. Tez kapsamında ADÜ'lerin yerleri, talep noktalarının ADÜ'lere atanması, ADÜ ağı tasarımı ve bu ağda hizmet verecek olan farklı ulaşım yollarında farklı tipteki araçların sayılarının etkin bir şekilde belirlenmesi üzerinde çalışılmıştır.

Çalışmaya öncelikle sistemin gerçek hayattaki işleyişi incelenerek başlanmış ve bu kapsamda Türkiye'de hizmet vermekte olan üç büyük kargo firmasının transfer merkezlerine ve şubelerine ziyaretler gerçekleştirilmiştir. Yanısıra, gerçekleştirilen kapsamlı literatür taraması ile ele alınan probleme benzer problemler incelenmiş ve çözümlerine ilişkin yaklaşımlar hakkında bilgi edinilmiştir.

Problem için karma tamsayılı bir programlama modeli geliştirilmiştir. Ele alınan problem NP-Zor bir problem olduğundan geliştirilen modelin ticari çözümler ile makul sürelerde tüm Türkiye verisi ile çözümü mümkün olmamıştır. Bu nedenle problemin çözümü için bir sezgisel algoritma geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda ele alınan probleme benzer problemler için literatürde daha önce geliştirilmiş olan sezgisel algoritmalar incelenmiş ve çözüm için yerel arama tabanlı özgün bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın performansı hakkında bilgi sahibi olabilmek için Türkiye verisi ve literatürde sıklıkla kullanılan CAB verisi kullanılmıştır. Bu veriler üzerinde CPLEX yazılımı kullanılarak elde edilen optimal sonuçlar sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Sezgisel algoritma ile Türkiye verisi üzerinde optimal çözümden ortalama olarak yaklaşık olarak %1 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir. CAB verisi ile de benzer bir analiz gerçekleştirilmiş ve sezgisel algoritma ile optimal çözümden ortalama olarak en fazla %4 uzaklıkta çözümler elde edilmiştir.

Türkiye veri kümesi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen modelin Türkiye'de faaliyet gösteren kargo firmalarının transfer merkezlerinin sayısından

daha az transfer merkezi açmaya ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Transfer merkezlerinin yerleri incelendiğinde ise transfer merkezi kurmak için en fazla talebe sahip olan şehirlerin seçildiği ve her coğrafi bölgede en az bir transfer merkezi bulunacak şekilde sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar gerçek hayat gözlemleri sırasında kargo firmalarından elde edilen bilgiler ile örtüşmektedir. Talep noktalarının ADÜ'lere olan atanmaları incelendiğinde kargo firmalarının da tercih ettikleri gibi talep noktalarının çoğunlukla kendilerine en yakın olan ADÜ'lere atandığı görülmektedir. ADÜ ağında kullanılan araçlar incelendiğinde ise genelde ADÜ'ler arasında karşılıklı olarak aynı araçların çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçların da ikinci bölümde sunulan gerçek hayat gözlemleri kısmında verilmiş olan bilgiler ile örtüştüğü görülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında önerilen modelin gerçekçi sonuçlar ürettiğini söylemek mümkündür.

Ele alınan probleme yönelik olarak ileriki zamanlarda çeşitli çalışmalar yapılabilir. Bu çalışmada kargo firmalarının gerçekleştirdiği küçük paket ve dosya taşımacılığı ele alınmıştır. Küçük paket ve dosya taşımacılığında araçların kapasiteleri için taşıyacakları ağırlık bazında kısıt bulunmaktadır. İleride koli taşımacılığı da sisteme eklenip kapasite kısıtları hacimsel olarak ele alınabilir. Ayrıca, kargo firmalarının kullandıkları farklı hizmetler de önerilen modele eklenebilir. Bu durumda, kargonun zamanında teslimat adresine ulaştırılabilmesi için zaman kısıtlarının tanımlanması gerekecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Alumur S., Kara B.Y., Network hub location problems: The state of the art, *European Journal of Operational Research*, 190, 1-21, 2008.
- [2] O'Kelly, M.E., A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities, *European Journal of Operational Research*, 32, 393-404, 1987.
- [3] Campbell, J.F., Integer programming formulations of discrete hub location problems, *European Journal of Operational Research* 72, 387–405, 1994b.
- [4] O'Kelly M.E., Hub facility location with fixed costs, *Papers in Regional Science*, 71, 293-306, 1992.
- [5] Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem, *Location Science*, 4(3), 139–154, 1996.
- [6] Tan, P.Z., Kara, B.Y., A hub covering model for cargo delivery systems, *Networks* 49(1), 28–39, 2007.
- [7] Beasley J.E., OR-Library: Hub location erişim adresi: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/phubinfo.html>, erişim tarihi: 11 Ağustos 2011.
- [8] Campbell, J.F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy M., *Hub Location Problems, Facility Location: Applications and Theory*, ed: Drezner, Z., Hamacher, H., Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [9] Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B., Nikbakhsh, E., Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications, *Computers and Industrial Engineering*, 64, 1096-1109, 2013.
- [10] Nickel S., Schobel A., Sonneborn T., *Hub Location problems in urban traffic networks*, *Mathematics Methods and Optimization in Transportation Systems*, ed: Nittymäki J., Pursula M., Kluwer Academic Publishers, 1-12, (2001).
- [11] Yoon M.G., Current J., The hub location and network design problem with fixed and variable arc costs: formulation and dual-based solution heuristic, *Journal of the Operational Research Society*, 59, 80-89, (2008).
- [12] Alumur S.A., Kara B.Y., Karasan O.E., The design of single allocation incomplete hub networks, *Transportation Research Part B*, 43, 936-951, (2009).
- [13] Alumur S., Kara B.Y., A hub covering network design problem for cargo applications in Turkey, *Journal of the Operational Research Society*, 60, 1349-1359, (2009).

- [14] Calik H., Alumur S.A., Kara B.Y., Karasan O.E. A tabu-search based heuristic for the hub covering problem over incomplete hub networks, *Computers and Operations Research*, 36, 3088-3096, (2009).
- [15] Campbell J.F., Ernst A.T., Krishnamoorthy M., Hub arc location problems: Part I-Introduction and Results, *Management Science*, 51, 1540-1555, (2005).
- [16] Campbell J.F., Ernst A.T., Krishnamoorthy M., Hub arc location problems: Part II-Formulations and Optimal Algorithms, *Management Science*, 51, 1556-1571, (2005).
- [17] Campbell J.F., Hub location for time definite transportation, *Computers and Operations Research*, 36, 3107-3116, (2009).
- [18] Contreras I., Fernandez E., Marin A., Tight bounds from a path based formulation for the tree of hub location problem, *Computers and Operations Research*, 36, 3117-3127, (2009).
- [19] Contreras I., Fernandez E., Marin A., The tree of hubs location problem, *European Journal of Operational Research*, 202, 390-400, (2010).
- [20] Labbe M., Yaman H., Solving the hub location problem in a star-star network, *Networks*, 51, 19-33, (2008).
- [21] Yaman H., The hierarchical hub median problem with single assignment, *Transportation Research Part B*, 43, 643-658, (2009).
- [22] Ishfaq R., LTL logistics networks with differentiated services. *Computers and Operations Research*, 39, 2867-2879, (2012).
- [23] Jaillet, P., Song, G., Yu, G., Airline network design and hub location problems. *Location Science* 4 (3), 195–212, (1996).
- [24] Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., Modelling a rail/road intermodal transportation system, *Transportation Research Part E*, 40, 255-970, 2004.
- [25] Groothedde, B, Ruijgrok, C, Tavasszy, L., Towards collaborative, intermodal hub networks: a case study in the fast moving consumer goods market, *Transportation Research Part E*, 41, 567–83, 2005.
- [26] Limbourg, S., Jourquin, B., Optimal rail-road container terminal locations on the European network, *Transportation Research Part E*, 45, 551-563, 2009.
- [27] Ishfaq, R., Sox, CR., Intermodal logistics: the interplay of financial, operational and service issues, *Transportation Research Part E*, 46, 926–949, 2010.

- [28] Ishfaq, R., Sox, C.R., Hub location-allocation in intermodal logistic networks, *European Journal of Operational Research*, 210, 213-230, 2011.
- [29] Alumur, S.A., Kara, B.Y., Karasan, O.E., Multimodal hub location and hub network design, *OMEGA*, 40, 927-939, 2012.
- [30] Alumur, S.A., Yaman, H., Kara, B.Y., Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries, *Transportation Research Part E*, 48, 1107-1120, 2012.
- [31] Crainic, T.G., Service network design in freight transportation, *European Journal of Operational Research*, 122(2), 272–88, 2000.
- [32] Crainic, T.G., Kim, K.H., *Intermodal Transportation, Handbooks in operations reserach and management*, ed: Barnhart, C., Laporte, G., Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [33] Kim, D., Barnhart, C., Ware, K., Reinhardt, G., Multimodal express package delivery: a service network design application, *Transportation Science*, 33(4), 391–407, 1999.
- [34] Crainic, T.G., Laporte, G., Planning models for freight transportation, *European Journal of Operational Research*, 97(3), 409–38, 1997.
- [35] Klincewicz, J.G., Heuristics for the p-hub location problem, *European Journal of Operational Research*, 53, 25-37, 1991.
- [36] Klincewicz, J.G., Avoiding local optima in the p-hub location problem using tabu search and GRASP, *Annals of Operations Research*, 40, 283-302 1992.
- [37] Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., On tabu search for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 73, 502-509, 1994.
- [38] Abdinnour-Helm, S., Venkataramanan, M.A., Solution approaches to hub location problems, *Annals of Operations Research*, 78, 31-50, 1998.
- [39] Abdinnour-Helm, S., A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem, *European Journal of Operational Research*, 106 (2-3), 489-499, 1998.
- [40] Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem, *Annals of Operations Research*, 86, 141–159, 1999.
- [41] Pamuk, F.S., Sepil, C., A solution to the hub center problem via a single-relocation algorithm with tabu search, *IIE Transactions*, 33 (5), 399–411, 2001.

- [42] Abdinnour-Helm, S., Using simulated annealing to solve the p-hub median problem. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 31 (3), 203–220, 2001.
- [43] Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., Yilmaz, G., Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms, *Computers & OR*, 32 (4), 967–984, 2005.
- [44] Cunha, C.B., Silva, M.R., A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil, *European Journal of Operational Research*, 179, 747–758, 2007.
- [45] Chen, J.F., A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem, *Omega*, 35, 211–220, 2007.
- [46] Kratica, J., Stanimirovic, Z., Tomic, D., Filipovic, V., Two genetic algorithms for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem, *European Journal of Operational Research*, 182, 15–28, 2007.
- [47] Silva, M.R., Cunha, C.B., New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem, *Computers & Operations Research*, 36, 3152–3165, 2009.
- [48] Ilic, A., Urosevic, D., Brimberg, J., Mladenovic, H., A general variable neighborhood search for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem, *European Journal of Operational Research*, 206, 289–300, 2010.
- [49] Lin, C.C., Lin, J.Y., Chen, Y.C., The capacitated p-hub median problem with integral constraints: An application to a Chinese air cargo network, *Applied Mathematical Modelling*, 36, 2777–2787, 2012.
- [50] Gomes, B.N., Martins, A.X., Camargo, R.S., Ramirez, J.A., An Efficient Genetic Algorithm for the Design of Hub-and-Spoke Networks, *IEEE Communications Letters*, 17, 4, 2013.
- [51] Cetiner S., Sepil C., Süral H., Hubbing and routing in postal delivery systems, *Annals of Operations Research*, 181, 109-124, 2010.
- [52] Yaman, H., Kara, B.Y., Tansel, B.C., The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers, *Transportation Research Part B* 41(8), 906–919, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SERPER, Elif Zeynep
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 11.10.1988, Altındağ
Medeni hali : Bekar
Telefon : +905418141107
e-mail : ezserper@gmail.com

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|--------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | TOBB ETÜ / Endüstri Müh. | Nisan 2014 |
| Lisans | TOBB ETÜ / Endüstri Müh. | Ağustos 2011 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|--------------------------|----------|---------------------|
| Eylül 2011- Ocak 2014 | TOBB ETÜ | Araştırma Görevlisi |
| Nisan 2011- Ağustos 2011 | TAI | Uzun Dönem Stajyer |
| Eylül 2009 - Aralık 2009 | TAI | Uzun Dönem Stajyer |
| Eylül 2008 - Aralık 2008 | Aselsan | Uzun Dönem Stajyer |

Yabancı Dil

İngilizce (İleri), İspanyolca (Temel)

Konferanslar

International IIE Conference & YA/EM 2013, İstanbul, Türkiye, (Haziran 2013), Ulaşım Maliyeti Odaklı Ana Dağıtım Üssü Yer Seçimi ve Kapasiteli İntermodal Ana Dağıtım Üssü Ağları Tasarımı.

EWGLA XX - EURO Working Group on Locational Analysis Meeting, Ankara, Türkiye, (Nisan 2013), Hub location and the design of capacitated intermodal hub networks.

GCSM 2012 - 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing, İstanbul, Türkiye, (Kasım 2012), Designing a Sustainable Receiving Dock System Using Automated Guided Vehicles.

YA/EM 2011 31, Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, Sakarya, Türkiye, (Temmuz 2011), Türk Traktör Depo Yönetimi Optimizasyonu.

EKLER

EK 1: Türkiye’de bazı iller arasında dosya taşımacılığında ücret (TL) ve süre (saat) karşılaştırılması. (Mayıs 2013 itibari ile)

| İller | Mesafe | Aras Kargo | | | | Yurtiçi Kargo | | | | MNG Kargo | | | |
|---------------------|--------|------------|------|-----------|----------|---------------|------|-----------|----------|-----------|------|-----------|----------|
| | | Ücret | Süre | VIP Ücret | VIP Süre | Ücret | Süre | VIP Ücret | VIP Süre | Ücret | Süre | VIP Ücret | VIP Süre |
| Edirne-Tekirdağ | 140 | 7,80 | 24 | 17,70 | 16 | 7,25 | 24 | - | - | 7,67 | 18 | - | - |
| Kırıkkale-Yozgat | 141 | 7,80 | 24 | 17,70 | 16 | 7,25 | 24 | - | - | 7,67 | 18 | - | - |
| Ankara-Düzce | 236 | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | - | - | 8,33 | 18 | - | - |
| Düzce-Ankara | | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | - | - | 8,33 | 18 | - | - |
| Ankara-Istanbul | 453 | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | 60,48 | 8 | 8,33 | 18 | 82 | 8 |
| Ankara-Balıkesir | 533 | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | - | - | 8,33 | 18 | - | - |
| İstanbul-İzmir | 561 | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | 60,48 | 8 | 8,33 | 18 | 85,90 | 8 |
| Ankara-İzmir | 579 | 8,32 | 24 | 17,70 | 16 | 7,79 | 24 | - | - | 8,33 | 18 | - | - |
| Antalya-Istanbul | 716 | 8,89 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | 60,48 | 8 | 8,99 | 24 | 80,62 | 8 |
| Ankara-Erzurum | 871 | 8,89 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | - | - | 8,99 | 24 | - | - |
| Erzurum-Ankara | | 8,89 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | 13,88 | 24 | 8,99 | 24 | 86 | 8 |
| Hatay-Sinop | 963 | 8,89 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | - | - | 8,99 | 48 | - | - |
| Bursa-Tunceli | 1177 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Tunceli-Bursa | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| İstanbul-Erzurum | 1225 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | 18 | 24 |
| Erzurum-İstanbul | 1225 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | 86 | 8 |
| Bursa-Diyarbakır | 1281 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | - | - |
| Diyarbakır-Bursa | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Antalya-Rize | 1310 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | - | - |
| Rize-Antalya | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 8,47 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Diyarbakır-İstanbul | 1363 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | - | - |
| İstanbul-Diyarbakır | 1363 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | 18 | 24 |
| Edirne-Rize | 1371 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | 17,5 | 24 |
| Rize-Edirne | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Erzurum-İzmir | 1450 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | - | - |
| Ardahan-Muğla | 1705 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Muğla-Ardahan | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| İzmir-Van(Merkez) | 1762 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | 16 | 24 |
| Van-İzmir | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | 13,88 | 24 | 9,65 | 48 | - | - |
| Çanakkale-Iğdır | 1798 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |
| Edirne-Hakkari | 2042 | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | 17,5 | 24 |
| Hakkari-Edirne | | 9,50 | 48 | 12,98 | 24 | 9,10 | 48 | - | - | 9,65 | 48 | - | - |

EK 2: Türkiye 16 il ve CAB veri kümeleri ile gerçekleştirilen analizler.

a. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 6 | 1,67 | 5 | 1,63 | 7 | 1,67 | 7 | 1,67 | 6 | 1,70 | 1,67 |
| | | | II | 9 | 1,58 | 9 | 1,58 | 7 | 1,58 | 8 | 1,22 | 9 | 1,62 | 1,52 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 6 | 1,37 | 6 | 1,56 | 8 | 1,56 | 7 | 1,56 | 8 | 1,56 | 1,52 |
| | | | II | 9 | 1,51 | 8 | 1,48 | 8 | 1,48 | 7 | 1,51 | 7 | 1,48 | 1,49 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 7 | 1,49 | 7 | 1,46 | 8 | 1,49 | 7 | 1,49 | 7 | 1,46 | 1,48 |
| | | | II | 7 | 1,39 | 8 | 1,39 | 8 | 1,39 | 9 | 1,39 | 9 | 1,42 | 1,39 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 6 | 1,40 | 7 | 1,40 | 7 | 1,40 | 7 | 1,38 | 7 | 1,35 | 1,39 |
| | | | II | 9 | 1,30 | 8 | 1,30 | 8 | 1,33 | 8 | 1,30 | 9 | 1,33 | 1,32 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 8 | 0,48 | 8 | 0,49 | 8 | 0,48 | 7 | 0,48 | 7 | 0,39 | 0,46 |
| | | | II | 8 | 0,42 | 9 | 0,50 | 9 | 0,50 | 8 | 0,50 | 9 | 0,50 | 0,49 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 6 | 0,09 | 7 | 0,00 | 7 | 0,09 | 7 | 0,09 | 8 | 0,09 | 0,07 |
| | | | II | 9 | 0,11 | 9 | 0,11 | 9 | 0,11 | 9 | 0,11 | 8 | 0,11 | 0,11 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 9 | 0,09 | 8 | 0,09 | 7 | 0,09 | 6 | 0,09 | 6 | 0,09 | 0,09 |
| | | | II | 8 | 0,03 | 8 | 0,03 | 7 | 0,11 | 8 | 0,11 | 8 | 0,11 | 0,08 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 7 | 0,94 | 7 | 0,95 | 7 | 0,97 | 7 | 0,96 | 7 | 0,95 | 0,95 |
| | | | II | 8 | 0,91 | 8 | 0,91 | 8 | 0,93 | 8 | 0,88 | 8 | 0,94 | 0,91 |

b. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 8 | 1,70 | 8 | 1,70 | 9 | 1,70 | 9 | 1,70 | 8 | 1,67 | 1,70 |
| | | | II | 8 | 1,62 | 7 | 1,62 | 7 | 1,62 | 8 | 1,58 | 7 | 1,58 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 8 | 1,56 | 11 | 1,56 | 8 | 1,56 | 9 | 1,52 | 9 | 1,56 | 1,55 |
| | | | II | 7 | 1,48 | 8 | 1,37 | 8 | 1,48 | 6 | 1,51 | 7 | 1,48 | 1,46 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 8 | 1,43 | 7 | 1,46 | 7 | 1,43 | 10 | 1,43 | 8 | 1,03 | 1,36 |
| | | | II | 6 | 1,39 | 6 | 1,39 | 7 | 1,39 | 6 | 1,42 | 7 | 1,42 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 11 | 1,40 | 7 | 1,40 | 8 | 0,97 | 6 | 1,00 | 7 | 1,38 | 1,23 |
| | | | II | 7 | 1,33 | 7 | 1,33 | 6 | 1,33 | 7 | 1,33 | 7 | 1,30 | 1,33 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 7 | 0,84 | 8 | 1,00 | 8 | 0,49 | 8 | 1,04 | 7 | 0,48 | 0,77 |
| | | | II | 8 | 0,50 | 5 | 0,93 | 7 | 0,93 | 6 | 0,93 | 6 | 0,93 | 0,84 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 7 | 0,37 | 7 | 0,53 | 7 | 0,09 | 8 | 0,59 | 8 | 1,97 | 0,71 |
| | | | II | 6 | 0,44 | 8 | 0,44 | 6 | 0,44 | 7 | 0,61 | 7 | 0,61 | 0,51 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 8 | 0,55 | 7 | 0,58 | 8 | 0,43 | 8 | 0,58 | 7 | 0,58 | 0,54 |
| | | | II | 8 | 0,11 | 8 | 0,11 | 8 | 0,57 | 6 | 0,59 | 8 | 0,57 | 0,39 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 8 | 1,12 | 8 | 1,18 | 8 | 0,95 | 8 | 1,12 | 8 | 1,24 | 1,12 |
| | | | II | 7 | 0,98 | 7 | 1,03 | 7 | 1,11 | 7 | 1,14 | 7 | 1,13 | 1,08 |

c. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} + 2$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n} + 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 10 | 1,63 | 12 | 1,70 | 13 | 1,70 | 13 | 1,67 | 15 | 1,70 | 1,68 |
| | | | II | 12 | 1,58 | 12 | 1,58 | 11 | 1,58 | 11 | 1,62 | 10 | 1,62 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 12 | 1,59 | 12 | 1,56 | 14 | 1,56 | 14 | 1,52 | 13 | 1,56 | 1,56 |
| | | | II | 12 | 1,48 | 9 | 1,48 | 12 | 1,48 | 11 | 1,51 | 11 | 1,51 | 1,49 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 12 | 1,46 | 13 | 1,46 | 15 | 1,49 | 16 | 1,46 | 11 | 1,43 | 1,46 |
| | | | II | 12 | 1,42 | 10 | 1,39 | 13 | 1,39 | 11 | 1,39 | 13 | 1,42 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 13 | 1,40 | 13 | 1,40 | 15 | 1,40 | 12 | 1,38 | 12 | 1,40 | 1,40 |
| | | | II | 13 | 1,33 | 12 | 2,19 | 12 | 1,33 | 13 | 1,33 | 13 | 1,33 | 1,50 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 14 | 0,84 | 14 | 1,45 | 13 | 1,50 | 14 | 1,47 | 15 | 1,00 | 1,25 |
| | | | II | 10 | 1,35 | 10 | 1,02 | 11 | 1,00 | 12 | 1,49 | 11 | 1,02 | 1,18 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 13 | 0,09 | 12 | 0,59 | 13 | 2,40 | 13 | 2,40 | 14 | 3,79 | 1,85 |
| | | | II | 11 | 3,76 | 14 | 0,61 | 12 | 3,73 | 13 | 3,12 | 9 | 3,12 | 2,87 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 13 | 2,87 | 13 | 2,59 | 13 | 0,58 | 13 | 0,43 | 13 | 0,54 | 1,40 |
| | | | II | 15 | 2,87 | 14 | 3,53 | 13 | 0,59 | 11 | 2,63 | 12 | 2,63 | 2,45 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 12 | 1,41 | 13 | 1,54 | 14 | 1,52 | 14 | 1,48 | 13 | 1,63 | 1,52 |
| | | | II | 12 | 1,97 | 12 | 1,68 | 12 | 1,59 | 12 | 1,87 | 11 | 1,81 | 1,78 |

d. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 37 | 1,70 | 37 | 1,63 | 29 | 1,67 | 30 | 1,67 | 39 | 1,67 | 1,67 |
| | | | II | 34 | 1,58 | 29 | 1,62 | 27 | 1,62 | 41 | 1,58 | 37 | 1,22 | 1,52 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 35 | 1,52 | 35 | 1,52 | 30 | 1,52 | 36 | 1,52 | 37 | 1,52 | 1,52 |
| | | | II | 37 | 1,51 | 33 | 1,51 | 27 | 1,51 | 31 | 1,51 | 35 | 1,51 | 1,51 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 34 | 1,43 | 34 | 1,43 | 49 | 1,46 | 36 | 1,28 | 33 | 1,03 | 1,33 |
| | | | II | 30 | 1,39 | 29 | 1,39 | 31 | 1,42 | 30 | 1,39 | 40 | 1,42 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 29 | 1,35 | 37 | 1,38 | 41 | 1,35 | 37 | 1,35 | 36 | 1,38 | 1,36 |
| | | | II | 35 | 1,33 | 25 | 1,30 | 50 | 1,21 | 27 | 0,97 | 27 | 1,33 | 1,23 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 35 | 0,39 | 49 | 0,48 | 23 | 0,48 | 35 | 0,48 | 45 | 0,48 | 0,46 |
| | | | II | 34 | 0,42 | 37 | 0,50 | 30 | 0,50 | 29 | 0,50 | 31 | 0,42 | 0,47 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 33 | 0,09 | 31 | 0,09 | 33 | 0,00 | 26 | 0,00 | 33 | 0,09 | 0,06 |
| | | | II | 37 | 0,11 | 39 | 0,11 | 36 | 0,11 | 39 | 0,11 | 35 | 0,03 | 0,09 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 28 | 0,09 | 28 | 0,09 | 28 | 0,09 | 44 | 0,00 | 30 | 0,00 | 0,05 |
| | | | II | 30 | 0,11 | 48 | 0,11 | 40 | 0,03 | 27 | 0,11 | 34 | 0,11 | 0,09 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 33 | 0,94 | 36 | 0,95 | 33 | 0,94 | 35 | 0,90 | 36 | 0,88 | 0,92 |
| | | | II | 34 | 0,92 | 34 | 0,94 | 34 | 0,91 | 32 | 0,88 | 34 | 0,86 | 0,90 |

e. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 70 | 1,70 | 57 | 1,70 | 57 | 1,67 | 62 | 1,22 | 48 | 1,63 | 1,59 |
| | | | II | 64 | 1,62 | 87 | 1,62 | 78 | 1,58 | 74 | 1,58 | 84 | 1,58 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 72 | 1,52 | 69 | 1,52 | 55 | 1,59 | 47 | 1,52 | 30 | 1,56 | 1,54 |
| | | | II | 67 | 1,48 | 50 | 1,51 | 94 | 1,10 | 97 | 1,51 | 59 | 1,37 | 1,39 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 64 | 1,43 | 79 | 1,28 | 70 | 1,43 | 49 | 1,06 | 33 | 1,43 | 1,33 |
| | | | II | 63 | 1,39 | 80 | 1,42 | 79 | 1,28 | 65 | 1,42 | 51 | 1,39 | 1,38 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 70 | 1,35 | 69 | 1,40 | 53 | 1,35 | 39 | 1,40 | 37 | 1,40 | 1,38 |
| | | | II | 65 | 1,33 | 77 | 1,33 | 73 | 1,30 | 100 | 1,30 | 75 | 1,33 | 1,32 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 63 | 1,00 | 63 | 0,84 | 67 | 0,49 | 62 | 0,48 | 56 | 0,48 | 0,66 |
| | | | II | 64 | 0,82 | 68 | 0,93 | 79 | 0,50 | 53 | 0,50 | 81 | 0,50 | 0,65 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 88 | 0,59 | 64 | 1,97 | 83 | 0,09 | 48 | 0,09 | 58 | 0,09 | 0,57 |
| | | | II | 77 | 0,58 | 60 | 0,11 | 71 | 0,11 | 55 | 0,44 | 87 | 0,44 | 0,34 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 67 | 0,09 | 71 | 0,09 | 88 | 0,09 | 91 | 0,09 | 81 | 0,09 | 0,09 |
| | | | II | 49 | 0,11 | 60 | 0,11 | 87 | 0,11 | 67 | 0,11 | 87 | 0,11 | 0,11 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 71 | 1,10 | 67 | 1,26 | 68 | 0,96 | 57 | 0,84 | 49 | 0,96 | 1,02 |
| | | | II | 64 | 1,05 | 69 | 1,00 | 80 | 0,86 | 73 | 0,98 | 75 | 0,96 | 0,97 |

f. Türkiye 16 il, yüksek kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} + 2$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n} + 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 562800 | 2636 | I | 89 | 1,63 | 91 | 1,63 | 79 | 1,70 | 74 | 1,67 | 82 | 1,70 | 1,67 |
| | | | II | 34 | 1,62 | 17 | 1,58 | 114 | 1,62 | 13 | 1,62 | 12 | 1,58 | 1,60 |
| 70000 | 602800 | 4195 | I | 92 | 1,52 | 117 | 1,56 | 113 | 1,59 | 89 | 1,56 | 91 | 1,56 | 1,56 |
| | | | II | 13 | 1,51 | 101 | 1,51 | 144 | 1,48 | 13 | 1,51 | 12 | 1,51 | 1,50 |
| 80000 | 642800 | 4189 | I | 62 | 1,49 | 79 | 1,43 | 82 | 1,46 | 92 | 1,43 | 150 | 1,43 | 1,45 |
| | | | II | 133 | 1,39 | 124 | 1,42 | 103 | 1,42 | 11 | 1,39 | 14 | 1,42 | 1,40 |
| 90000 | 682800 | 3015 | I | 119 | 1,38 | 92 | 1,40 | 117 | 1,35 | 85 | 1,38 | 78 | 1,35 | 1,37 |
| | | | II | 11 | 1,33 | 13 | 0,97 | 15 | 1,51 | 139 | 1,33 | 81 | 1,33 | 1,30 |
| 100000 | 721156 | 409 | I | 95 | 1,00 | 110 | 1,04 | 93 | 1,00 | 88 | 1,00 | 92 | 1,04 | 1,02 |
| | | | II | 100 | 1,33 | 144 | 1,35 | 13 | 0,93 | 113 | 0,93 | 122 | 1,35 | 1,18 |
| 110000 | 743961 | 18 | I | 97 | 2,40 | 83 | 2,59 | 111 | 0,57 | 93 | 0,59 | 91 | 0,57 | 1,34 |
| | | | II | 13 | 0,61 | 12 | 0,61 | 11 | 1,87 | 11 | 2,67 | 143 | 0,61 | 1,27 |
| 120000 | 763961 | 9 | I | 93 | 2,57 | 84 | 0,58 | 92 | 0,55 | 134 | 0,55 | 99 | 2,59 | 1,37 |
| | | | II | 12 | 3,53 | 13 | 2,63 | 132 | 0,11 | 12 | 2,63 | 123 | 0,59 | 1,90 |
| ORTALAMA | | 2067 | I | 92 | 1,71 | 94 | 1,46 | 98 | 1,17 | 94 | 1,17 | 98 | 1,46 | 1,40 |
| | | | II | 45 | 1,62 | 61 | 1,44 | 76 | 1,28 | 45 | 1,72 | 72 | 1,20 | 1,45 |

g. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 9 | 1,73 | 8 | 1,52 | 10 | 1,73 | 9 | 1,73 | 7 | 1,73 | 1,69 |
| | | | II | 6 | 1,28 | 7 | 1,68 | 5 | 1,68 | 6 | 1,52 | 6 | 1,68 | 1,57 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 7 | 1,61 | 7 | 1,61 | 6 | 1,42 | 7 | 1,61 | 7 | 1,61 | 1,58 |
| | | | II | 6 | 1,57 | 6 | 1,19 | 7 | 1,57 | 6 | 1,62 | 7 | 1,57 | 1,50 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 8 | 1,51 | 7 | 1,12 | 9 | 1,51 | 6 | 1,51 | 7 | 1,51 | 1,44 |
| | | | II | 6 | 1,47 | 6 | 1,47 | 6 | 1,47 | 6 | 1,41 | 6 | 1,44 | 1,45 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 9 | 1,43 | 6 | 1,43 | 7 | 1,43 | 7 | 1,05 | 9 | 1,40 | 1,35 |
| | | | II | 6 | 1,38 | 6 | 1,38 | 7 | 1,38 | 6 | 1,38 | 6 | 1,36 | 1,38 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 7 | 1,02 | 8 | 0,99 | 8 | 1,05 | 8 | 1,05 | 6 | 0,55 | 0,93 |
| | | | II | 6 | 0,50 | 7 | 0,43 | 5 | 0,53 | 6 | 0,57 | 5 | 0,50 | 0,51 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 7 | 0,62 | 7 | 0,17 | 8 | 0,47 | 7 | 2,00 | 6 | 0,47 | 0,74 |
| | | | II | 6 | 0,19 | 6 | 0,19 | 6 | 0,19 | 6 | 0,17 | 6 | 0,19 | 0,19 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 8 | 0,60 | 8 | 0,60 | 7 | 0,17 | 6 | 0,17 | 6 | 0,42 | 0,39 |
| | | | II | 6 | 0,19 | 6 | 0,19 | 6 | 0,19 | 6 | 0,19 | 7 | 0,19 | 0,19 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 8 | 1,22 | 7 | 1,06 | 8 | 1,11 | 7 | 1,30 | 7 | 1,10 | 1,16 |
| | | | II | 6 | 0,94 | 6 | 0,93 | 6 | 1,00 | 6 | 0,98 | 6 | 0,99 | 0,97 |

h. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 8 | 1,73 | 8 | 1,73 | 8 | 1,73 | 8 | 1,69 | 7 | 1,73 | 1,72 |
| | | | II | 5 | 1,64 | 7 | 1,68 | 7 | 1,28 | 7 | 1,64 | 7 | 1,68 | 1,58 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 7 | 1,19 | 8 | 1,61 | 8 | 1,58 | 7 | 1,61 | 8 | 1,58 | 1,52 |
| | | | II | 6 | 1,53 | 9 | 1,57 | 7 | 1,16 | 8 | 1,57 | 7 | 1,53 | 1,47 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 7 | 1,48 | 8 | 1,51 | 8 | 1,51 | 7 | 1,48 | 7 | 1,48 | 1,50 |
| | | | II | 7 | 1,47 | 7 | 1,47 | 7 | 1,47 | 7 | 1,47 | 7 | 1,44 | 1,46 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 7 | 1,43 | 8 | 1,43 | 8 | 1,43 | 9 | 1,05 | 8 | 1,43 | 1,35 |
| | | | II | 6 | 1,36 | 8 | 1,33 | 8 | 1,38 | 7 | 1,36 | 7 | 1,38 | 1,36 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 9 | 0,55 | 8 | 0,55 | 7 | 1,01 | 8 | 1,01 | 7 | 0,55 | 0,74 |
| | | | II | 7 | 0,57 | 5 | 0,94 | 7 | 0,94 | 7 | 0,92 | 8 | 0,50 | 0,78 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 7 | 2,00 | 8 | 1,11 | 8 | 2,00 | 8 | 1,11 | 8 | 0,17 | 1,28 |
| | | | II | 8 | 0,64 | 7 | 0,05 | 7 | 0,47 | 8 | 0,64 | 6 | 1,89 | 0,74 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 7 | 0,60 | 8 | 2,62 | 7 | 0,46 | 7 | 0,17 | 7 | 0,60 | 0,89 |
| | | | II | 8 | 0,62 | 7 | 0,19 | 7 | 2,65 | 9 | 2,65 | 8 | 0,46 | 1,31 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 7 | 1,28 | 8 | 1,51 | 8 | 1,39 | 8 | 1,16 | 7 | 1,08 | 1,28 |
| | | | II | 7 | 1,12 | 7 | 1,03 | 7 | 1,34 | 8 | 1,46 | 7 | 1,27 | 1,24 |

i. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} + 2$ ile 6000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 6000 çözüm - $p = \sqrt{n} + 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 11 | 1,73 | 14 | 1,73 | 10 | 1,73 | 11 | 1,73 | 10 | 1,73 | 1,73 |
| | | | II | 12 | 1,68 | 13 | 1,68 | 11 | 1,64 | 12 | 1,68 | 13 | 1,68 | 1,67 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 13 | 1,61 | 11 | 1,61 | 14 | 1,61 | 12 | 1,61 | 12 | 1,61 | 1,61 |
| | | | II | 10 | 1,76 | 10 | 1,57 | 10 | 1,57 | 10 | 1,53 | 8 | 1,53 | 1,59 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 14 | 1,51 | 11 | 1,48 | 12 | 1,48 | 13 | 1,48 | 11 | 1,51 | 1,50 |
| | | | II | 9 | 1,47 | 11 | 1,44 | 10 | 1,44 | 8 | 1,47 | 8 | 1,47 | 1,46 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 13 | 1,43 | 13 | 1,43 | 14 | 1,43 | 12 | 1,43 | 11 | 1,43 | 1,43 |
| | | | II | 16 | 1,36 | 13 | 1,36 | 11 | 1,33 | 9 | 1,38 | 12 | 1,38 | 1,36 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 12 | 1,54 | 12 | 1,05 | 12 | 1,52 | 11 | 1,43 | 9 | 1,54 | 1,42 |
| | | | II | 10 | 1,34 | 11 | 1,48 | 12 | 0,92 | 12 | 1,34 | 12 | 1,34 | 1,28 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 11 | 2,56 | 11 | 2,37 | 11 | 2,37 | 10 | 2,00 | 12 | 2,37 | 2,33 |
| | | | II | 11 | 2,28 | 12 | 2,28 | 12 | 0,64 | 12 | 2,28 | 10 | 2,72 | 2,04 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 12 | 4,04 | 13 | 3,61 | 12 | 3,61 | 13 | 2,89 | 13 | 3,61 | 3,56 |
| | | | II | 11 | 0,62 | 12 | 2,65 | 13 | 3,53 | 11 | 0,62 | 11 | 3,53 | 2,19 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 12 | 2,06 | 12 | 1,90 | 12 | 1,96 | 12 | 1,80 | 11 | 1,97 | 1,94 |
| | | | II | 11 | 1,50 | 12 | 1,78 | 11 | 1,58 | 11 | 1,47 | 11 | 1,95 | 1,66 |

j. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 50 | 1,73 | 70 | 1,69 | 53 | 1,73 | 77 | 1,52 | 67 | 1,73 | 1,68 |
| | | | II | 28 | 1,68 | 27 | 1,64 | 25 | 1,68 | 23 | 1,68 | 20 | 1,68 | 1,67 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 80 | 1,58 | 65 | 1,55 | 60 | 1,61 | 91 | 1,42 | 69 | 1,58 | 1,55 |
| | | | II | 30 | 1,57 | 20 | 1,42 | 29 | 1,53 | 25 | 1,57 | 27 | 1,53 | 1,53 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 64 | 1,51 | 50 | 1,51 | 59 | 1,12 | 67 | 1,51 | 94 | 1,12 | 1,36 |
| | | | II | 31 | 1,47 | 31 | 1,44 | 35 | 1,44 | 29 | 1,44 | 37 | 1,47 | 1,45 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 67 | 1,43 | 54 | 1,43 | 64 | 1,05 | 67 | 1,05 | 81 | 1,43 | 1,28 |
| | | | II | 39 | 1,02 | 37 | 1,38 | 31 | 1,38 | 28 | 1,36 | 31 | 1,38 | 1,31 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 93 | 1,01 | 59 | 0,51 | 51 | 0,49 | 65 | 0,55 | 77 | 1,01 | 0,72 |
| | | | II | 37 | 0,57 | 31 | 0,50 | 29 | 0,35 | 23 | 0,57 | 33 | 0,57 | 0,51 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 53 | 0,17 | 72 | 0,17 | 57 | 0,17 | 63 | 0,11 | 97 | 0,62 | 0,25 |
| | | | II | 31 | 0,19 | 29 | 0,19 | 27 | 0,05 | 22 | 0,17 | 29 | 0,19 | 0,16 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 74 | 0,46 | 74 | 0,17 | 48 | 0,17 | 80 | 0,17 | 57 | 0,46 | 0,28 |
| | | | II | 41 | 0,19 | 37 | 0,05 | 37 | 0,19 | 36 | 0,12 | 33 | 0,19 | 0,15 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 69 | 1,13 | 63 | 1,01 | 56 | 0,91 | 73 | 0,91 | 77 | 1,13 | 1,02 |
| | | | II | 34 | 0,96 | 30 | 0,95 | 30 | 0,95 | 27 | 0,99 | 30 | 1,00 | 0,97 |

k. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 74 | 1,73 | 47 | 1,69 | 72 | 1,73 | 63 | 1,28 | 49 | 1,28 | 1,54 |
| | | | II | 53 | 1,64 | 119 | 1,28 | 49 | 1,61 | 33 | 1,64 | 64 | 1,64 | 1,56 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 70 | 1,58 | 51 | 1,61 | 82 | 1,61 | 79 | 1,61 | 74 | 1,61 | 1,61 |
| | | | II | 59 | 1,13 | 63 | 1,57 | 57 | 1,57 | 62 | 1,53 | 46 | 1,57 | 1,47 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 61 | 1,51 | 80 | 1,48 | 42 | 1,51 | 57 | 1,56 | 74 | 1,51 | 1,52 |
| | | | II | 85 | 1,44 | 58 | 1,41 | 65 | 1,47 | 61 | 1,44 | 73 | 1,47 | 1,45 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 72 | 1,40 | 48 | 1,05 | 101 | 1,43 | 59 | 1,43 | 52 | 1,43 | 1,35 |
| | | | II | 55 | 1,38 | 41 | 1,38 | 70 | 1,38 | 50 | 1,36 | 43 | 1,38 | 1,38 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 51 | 0,55 | 68 | 0,49 | 51 | 1,01 | 54 | 0,55 | 73 | 0,46 | 0,61 |
| | | | II | 74 | 0,43 | 54 | 0,86 | 80 | 0,94 | 47 | 0,57 | 61 | 0,57 | 0,68 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 51 | 0,17 | 67 | 0,62 | 99 | 0,17 | 59 | 0,17 | 78 | 0,17 | 0,26 |
| | | | II | 46 | 0,17 | 82 | 0,13 | 49 | 0,17 | 54 | 0,47 | 60 | 0,64 | 0,31 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 60 | 0,17 | 45 | 0,17 | 50 | 0,17 | 60 | 0,17 | 57 | 0,46 | 0,22 |
| | | | II | 60 | 0,19 | 67 | 0,19 | 62 | 0,53 | 78 | 0,19 | 65 | 0,19 | 0,26 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 63 | 1,02 | 58 | 1,02 | 71 | 1,09 | 62 | 0,97 | 65 | 0,99 | 1,02 |
| | | | II | 62 | 0,91 | 69 | 0,97 | 62 | 1,10 | 55 | 1,03 | 59 | 1,07 | 1,01 |

I. Türkiye 16 il, düşük kapasite kümesi ve $p = \sqrt{n} + 2$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n} + 2$ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 563052 | 1345 | I | 14 | 1,73 | 77 | 1,69 | 74 | 1,73 | 14 | 1,69 | 11 | 1,73 | 1,72 |
| | | | II | 11 | 1,68 | 11 | 1,68 | 11 | 1,68 | 12 | 1,64 | 12 | 2,72 | 1,88 |
| 70000 | 603052 | 1639 | I | 125 | 1,61 | 15 | 1,58 | 122 | 1,61 | 141 | 1,58 | 130 | 1,61 | 1,60 |
| | | | II | 153 | 1,57 | 11 | 1,57 | 13 | 1,53 | 13 | 1,57 | 132 | 1,57 | 1,56 |
| 80000 | 643052 | 906 | I | 13 | 1,51 | 16 | 1,51 | 111 | 1,51 | 14 | 1,51 | 17 | 1,51 | 1,51 |
| | | | II | 91 | 1,44 | 80 | 1,47 | 81 | 1,47 | 102 | 1,47 | 37 | 1,44 | 1,46 |
| 90000 | 683052 | 998 | I | 14 | 1,40 | 86 | 1,43 | 119 | 1,43 | 19 | 1,40 | 12 | 1,43 | 1,41 |
| | | | II | 125 | 1,38 | 127 | 1,33 | 14 | 1,36 | 76 | 1,38 | 11 | 1,05 | 1,30 |
| 100000 | 721656 | 347 | I | 109 | 1,43 | 94 | 1,43 | 102 | 1,01 | 121 | 1,01 | 87 | 1,01 | 1,18 |
| | | | II | 123 | 0,86 | 12 | 1,48 | 139 | 1,32 | 13 | 1,50 | 13 | 1,03 | 1,24 |
| 110000 | 744361 | 14 | I | 17 | 2,00 | 14 | 2,97 | 15 | 2,37 | 111 | 2,00 | 113 | 0,17 | 1,90 |
| | | | II | 14 | 0,64 | 12 | 2,28 | 104 | 1,88 | 11 | 3,78 | 97 | 0,47 | 1,81 |
| 120000 | 764361 | 15 | I | 18 | 3,61 | 92 | 0,60 | 119 | 3,30 | 99 | 0,60 | 19 | 0,46 | 1,71 |
| | | | II | 141 | 0,62 | 97 | 2,89 | 94 | 2,65 | 123 | 2,65 | 130 | 0,16 | 1,80 |
| ORTALAMA | | 752 | I | 44 | 1,90 | 56 | 1,60 | 95 | 1,85 | 74 | 1,40 | 56 | 1,13 | 1,58 |
| | | | II | 94 | 1,17 | 50 | 1,81 | 65 | 1,70 | 50 | 2,00 | 62 | 1,21 | 1,58 |

m. CAB veri kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 85 | 7,84 | 33 | 4,62 | 10 | 8,97 | 125 | 7,84 | 11 | 7,84 | 7,42 |
| | | | II | 132 | 7,72 | 119 | 7,68 | 10 | 7,72 | 131 | 7,72 | 107 | 7,72 | 7,71 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 10 | 6,29 | 130 | 6,29 | 87 | 6,29 | 134 | 5,56 | 133 | 2,10 | 5,31 |
| | | | II | 10 | 6,18 | 126 | 6,18 | 125 | 6,18 | 10 | 6,50 | 138 | 6,00 | 6,21 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 132 | 4,90 | 11 | 4,90 | 10 | 5,10 | 10 | 5,10 | 10 | 4,90 | 4,98 |
| | | | II | 120 | 4,80 | 10 | 4,80 | 8 | 5,10 | 87 | 4,29 | 92 | 4,80 | 4,76 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 11 | 3,66 | 9 | 3,66 | 144 | 3,66 | 104 | 3,66 | 10 | 3,84 | 3,69 |
| | | | II | 92 | 3,56 | 10 | 4,51 | 83 | 3,56 | 110 | 3,56 | 91 | 3,56 | 3,75 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 11 | 2,53 | 71 | 2,53 | 11 | 2,53 | 111 | 2,53 | 10 | 3,44 | 2,71 |
| | | | II | 113 | 2,44 | 10 | 2,44 | 10 | 2,44 | 109 | 2,44 | 107 | 2,44 | 2,44 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 105 | 1,56 | 10 | 1,56 | 107 | 1,56 | 10 | 1,56 | 132 | 1,56 | 1,56 |
| | | | II | 10 | 1,73 | 122 | 1,47 | 11 | 3,17 | 11 | 1,47 | 124 | 1,47 | 1,86 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 10 | 1,50 | 125 | 1,50 | 111 | 1,50 | 120 | 1,50 | 10 | 1,50 | 1,50 |
| | | | II | 11 | 1,67 | 120 | 1,42 | 136 | 1,42 | 134 | 1,42 | 14 | 1,42 | 1,47 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 52 | 4,04 | 56 | 3,58 | 69 | 4,23 | 88 | 3,96 | 45 | 3,60 | 3,88 |
| | | | II | 70 | 4,02 | 74 | 4,07 | 55 | 4,23 | 85 | 3,91 | 96 | 3,92 | 4,03 |

n. CAB veri kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 12000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 12000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 13 | 3,90 | 13 | 3,90 | 14 | 7,40 | 13 | 7,05 | 11 | 3,90 | 5,23 |
| | | | II | 13 | 4,79 | 14 | 6,70 | 13 | 7,51 | 18 | 6,64 | 12 | 3,32 | 5,79 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 14 | 6,29 | 13 | 7,26 | 11 | 2,10 | 11 | 3,85 | 11 | 6,50 | 5,20 |
| | | | II | 13 | 6,50 | 13 | 6,50 | 10 | 6,18 | 14 | 3,22 | 11 | 7,23 | 5,93 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 14 | 5,10 | 11 | 5,10 | 12 | 4,90 | 12 | 5,10 | 13 | 4,90 | 5,02 |
| | | | II | 14 | 1,85 | 13 | 5,10 | 13 | 4,80 | 10 | 4,80 | 10 | 5,80 | 4,47 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 15 | 4,62 | 10 | 1,89 | 13 | 3,84 | 16 | 3,66 | 13 | 3,46 | 3,49 |
| | | | II | 15 | 3,56 | 14 | 2,90 | 12 | 2,08 | 12 | 4,51 | 12 | 3,84 | 3,38 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 11 | 2,53 | 11 | 2,53 | 11 | 2,53 | 12 | 2,53 | 12 | 5,60 | 3,14 |
| | | | II | 13 | 2,73 | 13 | 2,71 | 15 | 2,71 | 13 | 3,34 | 14 | 3,34 | 2,97 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 14 | 1,73 | 12 | 1,73 | 15 | 2,43 | 15 | 1,56 | 14 | 1,56 | 1,80 |
| | | | II | 16 | 1,73 | 15 | 1,47 | 12 | 1,73 | 15 | 2,33 | 10 | 2,33 | 1,92 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 13 | 2,35 | 13 | 2,35 | 11 | 1,67 | 12 | 1,50 | 12 | 1,67 | 1,91 |
| | | | II | 14 | 1,42 | 15 | 1,67 | 13 | 1,42 | 13 | 1,42 | 15 | 1,67 | 1,52 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 13 | 3,79 | 12 | 3,54 | 12 | 3,55 | 13 | 3,61 | 12 | 3,94 | 3,69 |
| | | | II | 14 | 3,23 | 14 | 3,86 | 13 | 3,78 | 14 | 3,75 | 12 | 3,93 | 3,71 |

o. CAB veri kümesi ve $p = \sqrt{n} - 2$ ile 24000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 24000 çözüm - $p = \sqrt{n} - 2$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 158 | 7,84 | 93 | 4,62 | 126 | 7,08 | 131 | 7,84 | 123 | 7,40 | 6,95 |
| | | | II | 100 | 7,72 | 151 | 7,72 | 151 | 7,72 | 123 | 6,89 | 117 | 6,70 | 7,35 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 124 | 4,77 | 92 | 6,29 | 115 | 6,29 | 160 | 6,29 | 153 | 6,50 | 6,03 |
| | | | II | 141 | 6,18 | 153 | 6,18 | 143 | 6,18 | 152 | 6,18 | 97 | 6,18 | 6,18 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 112 | 4,90 | 147 | 4,90 | 125 | 4,90 | 128 | 4,90 | 117 | 4,90 | 4,90 |
| | | | II | 120 | 4,80 | 137 | 4,80 | 140 | 4,80 | 167 | 4,80 | 165 | 4,80 | 4,80 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 124 | 3,66 | 101 | 3,66 | 150 | 3,46 | 148 | 3,46 | 164 | 3,66 | 3,58 |
| | | | II | 106 | 3,56 | 105 | 3,56 | 147 | 3,56 | 111 | 3,56 | 149 | 3,56 | 3,56 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 150 | 2,53 | 80 | 2,53 | 138 | 2,53 | 147 | 2,53 | 160 | 2,53 | 2,53 |
| | | | II | 158 | 2,44 | 178 | 2,44 | 147 | 2,44 | 119 | 2,44 | 177 | 2,44 | 2,44 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 97 | 1,56 | 135 | 1,56 | 164 | 1,73 | 150 | 1,56 | 78 | 1,56 | 1,59 |
| | | | II | 165 | 1,47 | 137 | 1,47 | 160 | 2,33 | 147 | 1,47 | 133 | 1,47 | 1,65 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 125 | 1,50 | 177 | 1,50 | 127 | 1,50 | 130 | 1,50 | 123 | 1,50 | 1,50 |
| | | | II | 161 | 1,42 | 123 | 1,42 | 179 | 1,42 | 143 | 1,42 | 162 | 1,42 | 1,42 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 127 | 3,82 | 118 | 3,58 | 135 | 3,93 | 142 | 4,01 | 131 | 4,01 | 3,87 |
| | | | II | 136 | 3,94 | 141 | 3,94 | 152 | 4,07 | 137 | 3,82 | 143 | 3,80 | 3,91 |

p. CAB veri kümesi ve $p = \sqrt{n}$ ile 24000 çözüm üretildiği durum.

| Sabit Maliyet | Optimal Çözüm | | Sezgisel Algoritma 24000 çözüm - $p = \sqrt{n}$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------|---|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Amaç Fonksiyonu Değeri | Çözüm Süresi (sn) | Araç Atama | Tekrar 1 | | Tekrar 2 | | Tekrar 3 | | Tekrar 4 | | Tekrar 5 | | Ortalama Fark (%) |
| | | | | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | Çözüm Süresi (sn) | Fark (%) | |
| 60000 | 848888 | 17849 | I | 180 | 6,77 | 211 | 2,60 | 198 | 7,02 | 200 | 2,60 | 172 | 4,98 | 4,79 |
| | | | II | 248 | 2,06 | 221 | 2,06 | 228 | 2,06 | 227 | 3,32 | 194 | 6,70 | 3,24 |
| 70000 | 898888 | 5945 | I | 241 | 2,10 | 200 | 3,52 | 170 | 2,10 | 204 | 6,29 | 256 | 2,46 | 3,29 |
| | | | II | 250 | 2,31 | 260 | 2,31 | 177 | 1,95 | 254 | 1,95 | 291 | 2,31 | 2,16 |
| 80000 | 948888 | 4332 | I | 164 | 2,33 | 167 | 3,65 | 174 | 1,99 | 213 | 1,99 | 288 | 3,49 | 2,69 |
| | | | II | 280 | 4,80 | 217 | 1,85 | 237 | 2,19 | 235 | 2,19 | 170 | 3,05 | 2,81 |
| 90000 | 998888 | 4680 | I | 268 | 2,21 | 213 | 3,66 | 235 | 3,31 | 242 | 3,66 | 187 | 2,21 | 3,01 |
| | | | II | 228 | 2,08 | 168 | 1,75 | 277 | 2,62 | 240 | 1,75 | 169 | 3,15 | 2,27 |
| 100000 | 1048888 | 11354 | I | 209 | 1,80 | 261 | 1,80 | 206 | 2,53 | 277 | 1,80 | 200 | 1,80 | 1,95 |
| | | | II | 224 | 1,67 | 244 | 2,44 | 248 | 2,44 | 271 | 1,09 | 290 | 1,67 | 1,86 |
| 110000 | 1098275 | 18909 | I | 270 | 1,56 | 235 | 1,56 | 240 | 1,56 | 222 | 1,56 | 249 | 1,56 | 1,56 |
| | | | II | 225 | 1,47 | 255 | 1,47 | 230 | 1,47 | 224 | 1,47 | 218 | 1,47 | 1,47 |
| 120000 | 1138275 | 10362 | I | 234 | 1,67 | 264 | 1,50 | 155 | 1,50 | 280 | 1,50 | 294 | 1,50 | 1,54 |
| | | | II | 275 | 1,42 | 244 | 1,67 | 221 | 1,42 | 234 | 1,42 | 145 | 1,42 | 1,47 |
| ORTALAMA | | 10490 | I | 224 | 2,63 | 222 | 2,61 | 197 | 2,86 | 234 | 2,77 | 235 | 2,57 | 2,69 |
| | | | II | 247 | 2,26 | 230 | 1,94 | 231 | 2,02 | 241 | 1,88 | 211 | 2,83 | 2,19 |

