

**SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA VE AĞ
TASARIMI İÇİN MODELLER**

Dilek UÇAR

Yüksek Lisans Tezi

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zühal KARTAL

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2020

ÖZET

SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA VE AĞ TASARIMI İÇİN MODELLER

Dilek UÇAR

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2020

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zühal KARTAL

Ana Dağıtım Üssü (ADÜ) ve talep merkezlerine ait serim tasarımı, ulaştırma ve lojistik yönetiminde karşılaşılan en önemli problemlerden birisidir. Bu serim tasarımına göre verilecek kararlar, araçların rotalarının ve açılacak ADÜ'lerin konumlarının belirlenmesidir. Literatürde bu iki problem genellikle ayrı olarak düşünülmüştür. Bu çalışmada ilk olarak literatürde yer alan her talep merkezi ve ADÜ çifti arasında bir aracın hizmet verme kısıtı gevşetilmiştir. ADÜ'lerin yerinin önceden bilindiği ve ADÜ olmayan her düğümün bir ADÜ'den hizmet aldığı varsayımıyla, literatürde ilk kez çalışılan “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi” için matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Problemin amacı, talep merkezlerinin ADÜ'lere atanmasını ve her ADÜ için tüm kaynak-varış çiftleri arasındaki en büyük seyahat uzunluğunun en küçük olacak şekilde araç rotalarının belirlenmesidir.

Bu çalışmada ikinci olarak, ADÜ yer seçimi problemlerindeki tam bağlantılı ADÜ tasarım ağı varsayımı gevşetilmiş ve serim tasarımı buna göre yapılmıştır. ADÜ'lerin yerinin önceden bilindiği ve ADÜ olmayan her düğümün bir ADÜ'den hizmet aldığı varsayımıyla, literatürde ilk defa yer alacak “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi” ve bu problem için matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen iki modelin uygulanabilirliği bazı problem örnekleri için Türkiye veri seti üzerinde test edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: ADÜ Yer Seçimi Problemi, p-ADÜ Merkez ve Araç Rotalama Problemi, Eksikli Ana Dağıtım Üssü Ağ Tasarımı, Sabit Yerleşimli Ana Dağıtım Üssü ve Rotalama Problemleri.

ABSTRACT

MODELS FOR FIXED HUB CENTER LOCATION ROUTING AND HUB NETWORK DESIGN

Dilek UÇAR

Department of Industrial Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2020

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Zühal KARTAL

The design of hub-and-spoke networks is one of the most important problems in transportation and logistics management. One of the most essential features of such a network is determining vehicle routes and the locations of hubs. Generally, these two main problems are considered separately in the literature. In this thesis, assuming the locations of the hubs are pre-determined and each non-hub city is served from a hub; firstly, we relax one of the main assumptions in the hub location literature that one vehicle has to operate between each demand center and hub. We propose into the literature Fixed HUB Center Location Routing Problem's mixed integer mathematical programming formulation. The aim of this problem is to allocate demand centers to the hubs and determine the routes of vehicles for each hub such that the maximum travel distance between all origin-destination pairs is minimized.

For this reason; secondly in this thesis, we relax the complete hub network assumption in the fixed hub center and routing problem and we focus on designing the hub networks that are incomplete. In this thesis, assuming the locations of the hubs are pre-determined and each non-hub city is served from a hub; as far as our knowledge it is the first time we propose into the literature "Fixed Hub Center Location Routing Problem; and Incomplete Hub Network Design Problem" mixed integer mathematical programming formulation. The applicability of the suggested two mathematical models are tested on some problem instances on Turkey dataset.

Keywords: Hub Location Problems, p-Hub Center and Vehicle Routing Problem, Incomplete Hub Network design, Fixed Hub and Vehicle Routing Problem.

TEŞEKKÜR

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Zühal Kartal’a tez çalışmam boyunca bana göstermiş olduğu tüm destek ve katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Tez çalışmamın daha iyi hale gelmesi için emek harcadığı için ve hayatımın her alanında çok iyi bir danışman olduğu için kendisine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili eşim Mustafa Geçer’e bana inandığı, her konuda beni desteklediği ve hep yanımda olduğu için sonsuz teşekkür ederim.

Her zaman beni destekleyen ve verdiğim kararlarda arkamda duran sevgili aileme çok teşekkürler.

Dilek UÇAR

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Dilek UÇAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. TEK ATAMALI SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA PROBLEMİ	23
3.1. Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi.....	23
3.1.1. Simetri Bozma Kısıtı.....	27
3.1.2. Geçerli Eşitsizlikler.....	30
3.2. Sayısal Sonuçlar	32
4. TEK ATAMALI SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA VE EKSİK BAĞLANTILI AĞ TASARIMI PROBLEMİ.....	48
4.1. Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi	48
4.1.1. Simetri Bozma Kısıtı.....	51
4.1.2. Geçerli Eşitsizlikler.....	54
4.2. Sayısal Sonuçlar	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79

KAYNAKÇA	80
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Model-3.1 ve Model-3.1(A) TR.16 $p=4,5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	29
Tablo 3.2. Model-3.1(A) ve Model-3.1(A+B) TR.16 $p=4,5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	31
Tablo 3.3. Model-3.1 TR.16 $p=3$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	33
Tablo 3.4. Araç Sayısının Maliyetler Üzerindeki Etkileri	34
Tablo 3.5. Model-3.1 TR.16 $p=4$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	38
Tablo 3.6. Model-3.1 TR.16 $p=5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	42
Tablo 3.7. Model-3.1 ADÜ Yerleri p-ADÜ Merkez Problemi ve Önerilen Yöntemle Belirlenen TR.16 $p=3,4,5$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Karşılaştırmalı Sayısal Sonuçları	44
Tablo 4.1. Model-4.1 ve Model-4.1(A) TR.16 $[(p=4 \text{ } q=4, 6), (p=5 \text{ } q=6, 10)]$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar	52
Tablo 4.2. Model-4.1(A) ve Geçerli Eşitsizlikler Kullanılarak Oluşturulmuş TR.16 Veri Seti Test Sonuçları	55
Tablo 4.3. Model-4.1 TR.16 $p=3$, $v=1,2,3$ $q=2$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları	58
Tablo 4.4. Model-4.1 TR.16 $p=3$, $v=1,2,3$ $q=3$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi değerleri 0'dır.	62
Tablo 4.5. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=3$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları	63
Tablo 4.6. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=4$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları	64
Tablo 4.7. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=4$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları	66
Tablo 4.8. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=5$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları	67

Tablo 4.9. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=5$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti	
Sayısal Sonuçları.....	68
Tablo 4.10. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=6$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti	
Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi	
değerleri 0'dır.	69
Tablo 4.11. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=6$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti	
Sayısal Sonuçları.....	70
Tablo 4.12. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=7$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti	
Sayısal Sonuçları.....	71
Tablo 4.13. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=8$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti	
Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi	
değerleri 0'dır.	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. TR.16.3.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi	36
Şekil 3.2. TR.16.4.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi	40
Şekil 3.3. TR.16.3.2 $\alpha=1$ ADÜ Yerleri Farklı Yöntemlerle Elde Edilmiş Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi.....	45
Şekil 3.4. TR.16.5.1 $\alpha=1$ ADÜ Yerleri Farklı Yöntemlerle Elde Edilmiş Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi.....	46
Şekil 4.1. TR.16.3.2.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-4.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi	59
Şekil 4.2. TR.16.5.1.7 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-4.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADÜ	: Ana Dağıtım Üssü
CAB	: Civil Aeronautics Board (Sivil Havacılık Otoritesi)
AP	: Avustralya Posta
PTT	: Türkiye Posta Telgraf Telefon
SADÜMRP	: Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi
SEADÜMRP	: Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi



1. GİRİŞ

Ana Dağıtım Üsleri (ADÜ'ler), lojistik dağıtım sistemlerinde toplama, düzenleme ve aktarma noktası olarak hizmet veren özel tesislerdir. ADÜ yer seçimi problemlerinin amacı, maliyetleri en aza indirmek için ADÜ yerlerinin belirlenmesi ve ADÜ olmayan düğümlerin ADÜ'lere tahsis edilmesini sağlamaktır. ADÜ'lerde yüksek miktarlarda akışın birikmesi nedeniyle ölçek ekonomisi olduğu varsayılmaktadır. Bu ölçek ekonomisi, her ADÜ çifti arasındaki ulaşım masrafları için sabit bir indirim oranı kullanılarak maliyetlere yansıtılmaktadır.

ADÜ yer seçim problemleri, matematiksel modellerin amaç fonksiyonlarına göre gruplandırılabilir. Literatürde; amaç fonksiyonunun toplam ulaşım maliyetinin en küçük olmasını sağlayan problemler (p-ADÜ medyan), minimum-maksimum tipindeki problemler (p-ADÜ merkez) ve kapsama tipi hedefleri (ADÜ kapsama) olan problemler incelenmiştir. Bunun yanı sıra kategorize edilen bu problemler tek atamalı ve çok atamalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek atamalı ADÜ yer seçimi problemlerinde, her kaynak noktasının sadece bir ADÜ'ye atanmasına izin verilmektedir. Tek atamalı ADÜ problemlerinde kaynak noktasından gönderilecek ve varış noktasına gelecek akışlar bağlı olduğu ADÜ üzerinden sağlanmaktadır. Çok atamalı ADÜ yer seçimi problemlerinde ise kaynak-varış noktaları birden fazla ADÜ'ye atanabilmektedir.

ADÜ yer seçimi problemlerinde, ADÜ'lerde yüksek miktarda akışın birikmesi ve bu akışların, talep noktası-ADÜ arasında kullanılan araçlardan daha büyük araçlarla taşınması birim taşıma maliyetini düşürmektedir. Bu maliyet düşüşü ölçek ekonomisinden kaynaklanmaktadır. Ölçek ekonomisi –indirim katsayısı- değeri 0 ile 1 arasında değişen bir katsayıdır ve ' α ' ile gösterilmektedir. ' α ' indirim katsayısı ADÜ çiftleri arasındaki birim maliyet olarak literatürde yer alan modellerde bulunmaktadır.

ADÜ yer seçimi problemleri; kargo şirketleri tarafından posta dağıtım sistemi problemlerinde, taşımacılık şirketleri tarafından ulaştırma problemlerinde ya da telekomünikasyon problemlerinde sıklıkla görülebilmektedir. Posta dağıtım sistemlerinde bir şehirden başka bir şehre gönderilmek istenen kargolar belirli merkezlerde toplanır. Sonrasında teslim edilecek şehirlere gönderilir. Bu noktada ADÜ tesisleri devreye girer. Taşımacılık sektörü ve telekomünikasyon problemlerinde de süreç benzerlik göstermektedir. Taşımacılık sektöründe kullanılan “akış” veya “talep” ifadeleri; uçak, tren, kamyon vb. araçlarla taşınacak yolcu sayısını ya da yük miktarını ifade

etmektedir. “Varış noktası” veya “düğüm noktaları” olarak nitelendirilen yer ise yolcuların/yüklerin bırakılacağı bölgeyi temsil etmektedir (Özger ve Oktal, 2009).

ADÜ yer seçimi problemleri, her ADÜ çiftinin birbiriyle bağlantısının olmasını gerektirir. Ancak gerçek hayattaki uygulamalar incelendiğinde tam bağlı ADÜ ağ tasarımına gerek olmadığı bilinmektedir. Bu sebeple ADÜ bağlantılarında eksikliklere izin verilen “Eksik bağlantılı ADÜ yer seçimi problemi” literatürde yer almaktadır.

Zamanla ADÜ yer seçim problemi sorunlarına ek olarak, hangi ADÜ’ler arasında akış olacağını ve kaynak-varış noktası arasındaki araçların hangi rotayı takip edeceklerini belirlemek için “ADÜ yeri belirleme ve araç rotalama” problemine ihtiyaç olmuştur. Özellikle son zamanlarda, Türkiye’de karayollarının geliştirilmesi, yolların duble hale getirilmesi, yenilenmesi ve şehirlerarası yeni rotaların oluşturulması ile taşımacılık sektöründe karayolu aktif rol oynamıştır. Yeni rotaların oluşturulmasıyla şehirlerarası taşımacılık daha hızlı hale gelmiştir (Kartal, 2014).

Türkiye’de ve tüm dünyada kargo/lojistik şirketlerinin en önemli hedefleri müşteri memnuniyetini sağlamaktır. Bu yüzden firmaların hizmet seviyelerine çok fazla dikkat ettikleri belirlenmiştir. Kargo şirketleri günümüzde “aynı gün içinde teslimat”, “ertesi gün teslimat” veya “24 saat içinde teslimat” garantisi vermeye başlamışlardır (Kartal vd., 2017). “Şehirde aynı gün içinde teslimat” uygulaması açılacak ADÜ yerlerinin konumlarının ve ADÜ’lere atanacak talep merkezlerinin belirlenmesini içerir. Bunun yanı sıra her talep merkezi-ADÜ arasına araç atanması; tasarım aşında hizmet veren araç sayısını arttırması ve bu durumun toplam verimliliği düşürmesi sebebiyle ADÜ yer seçimi problemlerindeki her talep düğümü-ADÜ arasına bir araç atanması kısıtının gevşetilmesi gerekmektedir. Talep merkezi ve ADÜ’ler arasında araç rotaları belirlenerek bir aracın birden fazla talep düğümüne uğraması ya da ADÜ’ler arasındaki bağlantıların azaltılması toplam maliyetin düşmesini sağlamaktadır.

2020 yılında ortaya çıkan koronavirüs salgını sebebiyle yaşanan pandemi sürecinde temel insani ve gıda ihtiyaçlarını karşılamak için internet alışverişi kullanımı yaygınlaşmıştır. İnternet aracılığıyla, alışveriş sitelerine verilen siparişlerin aynı gün içinde ve belirli saat aralığında teslim edilmesi gerekmektedir. Zamana duyarlı ürün taşıyan firmalarda ve şehir içi/şehirlerarası taşımacılık yapan kargo şirketlerinde de kargoların gönderilmesi için belirli bir zaman sınırlaması mevcuttur.

Bu çalışmanın motivasyon kaynağı internet aracılığıyla ürün satışı yapan şirketlerin, zamana duyarlı ürün taşıyan lojistik firmalarının ve şehir içi taşımacılık yapan kargo şirketlerinin operasyonel işlemleridir. ADÜ yerlerinin; düğümlerin hangi ADÜ'lere atanacağı kararının ve rotalama kararlarının zaman kısıtına göre planlanması sektör yöneticileri için oldukça stratejik önem taşıyan kararlardır. Çalışmada önerilen modeller de bu konuda karar vericilerin/yöneticilerin kararlarında yol gösterici olacaktır. Ancak benzer niteliklere sahip bir probleme Endonezya'da, adalar üzerine kurulan ADÜ'ler arasındaki konteyner dağıtım probleminde rastlanılmıştır (Mokhtar vd., 2017). Konteynerler, hem adalar arasındaki ADÜ'lere, hem de kendi bulundukları ada içerisinde rotalama yaparak ulaşmaktadırlar. ADÜ olmayan düğümlerin de kendi aralarında belirli sıralarda ziyaretleri mümkündür. Problemin amacı, oluşan trafiğin azalması için konteynerlerin en kısa yoldan gönderilmesidir. Ancak ADÜ yerlerinin belirlenmesi uzun dönemli, yüksek maliyetli stratejik kararlar içerdiğinden ADÜ yerlerinin önceden belirlenmiş olduğu varsayımıyla modellenmiştir.

Kartal ve Ernst (2015) p-ADÜ merkez ve rotalama problemi, ADÜ'lerin yerlerinin bulunması, talep merkezlerinin hangi ADÜ'lere atanacağı ve kaynak-varış noktası çifti arasındaki en büyük mesafe/seyahat süresinin en küçük olacak şekilde araç rotalarının belirlenmesi problemini ele alarak 4 indisli çoklu ürün akışına dayanan, 3 indisli araç-akış formülasyonuna dayanan ve literatürdeki p-ADÜ merkez problemine ait hız açısından en iyi performans gösteren yarıçap tabanlı 3 ayrı karma tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirerek literatüre sunmuşlardır. Kartal vd., (2019) aynı problem için 3 ayrı metasezgisel algoritma önererek, algoritmaların uygunluğunu test etmişlerdir.

Bu çalışmada ise, literatüre ilk olarak Kartal ve Ernst (2015) tarafından sunulan matematiksel modellerle aynı amaç fonksiyonuna sahip olan -talep merkezlerinin hangi ADÜ'ye atanacağının ve kaynak-varış noktası çifti arasındaki en büyük mesafenin en küçük olacak şekilde araç rotalarının belirlendiği- ancak bahsedilen çalışmadan farklı olarak ADÜ yerlerinin önceden belirli olduğu varsayımı altında, araç-akış formülasyonuna dayanan karmaşıklığı $O(n^3)$ olan ve ADÜ yerlerinin ayrı birer indis olarak tutulduğu 4 indisli yeni bir matematiksel model sunulmuştur. Bu model, 'Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi (SADÜMRP)' olarak adlandırılmıştır.

Gerçek hayattaki birçok uygulamada tam bağılı ADÜ ağına gerek olmadığı için ADÜ'ler arasındaki bağlantılar azaltılarak eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağlarının yer aldığı ve her talep düğümünün yalnızca bir ADÜ'ye atanabildiği SADÜMRP ile aynı amaç fonksiyonuna sahip, literatürde ilk defa yer alan 'Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi (SEADÜMRP)' sunulmuştur.

İzleyen bölümde ADÜ yer seçimi problemi, eksikli ADÜ yer seçimi problemi ve ADÜ yer seçimi ve rotalama problemlerinin literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise literatüre yeni sunulan "Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi", probleme ait matematiksel model ve sayısal sonuçlar yer almaktadır. Dördüncü bölümde ise literatüre yeni sunulan "Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi", probleme ait matematiksel model ve sayısal sonuçlar sunulmaktadır. İzleyen bölümde ise sonuç ve öneriler kısmına yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

ADÜ'ler havayolları, kargo dağıtım hizmetleri ve telekomünikasyon gibi çok düğümden çok düğüme ulaşım ağında toplama, düzenleme ve aktarma noktası olarak hizmet veren tesislerdir. ADÜ yer belirleme problemlerinin amacı, maliyetlerin en az olacak şekilde ADÜ yerlerinin belirlenmesi ve ADÜ olmayan düğümlerin ADÜ'lere atanmasını sağlamaktır. ADÜ'ler arasındaki taşımalar daha büyük araçlarla yapılabilmektedir. Bu da ölçek ekonomisi sayesinde birim taşıma maliyetlerini düşürmektedir.

ADÜ yer seçimi probleminin en yakın kavram olarak yer aldığı ilk makale Hakimi tarafından 1964 yılında yayınlanmıştır. Problemde, talep noktaları arasındaki akışın sağlanması için bir noktanın ADÜ olarak seçilmesi fikri incelenmiştir. Ertesi yıl aynı yazar tarafından taleplerin karşılanması için p sayıda ADÜ açılması probleminin incelendiği görülmektedir. (Hakimi, 1965).

Toh ve Higgins (1985) havayolu endüstrisinde ADÜ belirleme kavramını ilk olarak belirten çalışmayı sunmuşlardır. Ancak, literatürde matematiksel modelin de yer aldığı ADÜ yer seçimi probleminin incelendiği ilk çalışma O'Kelly (1986a) tarafından ortaya konulmuştur. O'Kelly bu çalışmada düzlemsel yerleşim problemlerini, bir ve iki ADÜ olacak şekilde modellemiştir.

O'Kelly (1986b) her kaynak-varış noktası çifti için akışların kurulacak ADÜ'lerin üzerinden olmasının daha az bağlantı sayısı oluşturacağını göstermiş ve ADÜ oluşturmak için gerekli maliyet parametrelerini dikkate alarak çalışmıştır. Ek olarak bu çalışmada nakliye maliyetlerinin en aza indirilmesi sonucu her bir düğümün en yakınında yer alan ADÜ'ye atanmayabileceğini göstermiştir.

O'Kelly (1987) havayolu yolcu ağlarını p -ADÜ medyan problemi olarak ele almıştır. Problemin çözümü için ilk karesel matematiksel modeli sunmuştur. Verilen ' n ' tane kaynak-varış noktasından, ' p ' tane ADÜ'nün seçilmesi ve bu ADÜ'lerin toplam taşıma maliyetini en küçüklemesi gerekmektedir.

Her talep noktası en yakın olduğu ADÜ'ye atanarak en iyi çözümü vermeyebilir. Bu yüzden Aykin (1990) akışa dayalı ADÜ yerleşim problemini ele almıştır. Klinecicz (1991) ise akışı ve mesafeyi dikkate alan ADÜ yerleşim problemini ele alarak modeli biraz daha genelleştirmiştir.

Campbell (1994b,1996) sonraki yıllarda ise benzer amaç fonksiyonuna sahip olan p-ADÜ belirleme probleminin çok atamalı versiyonu için modeller sunmuştur.

Literatürde 3 veri seti yer almaktadır. O’Kelly (1987) ABD’de bulunan 25 şehir arasındaki havayolu yolcu taşımacılığını değerlendirerek Sivil Havacılık Otoritesi (Civil Aeronautics Board kısaca CAB) adı verilen bir veri seti oluşturmuştur. CAB sonraki yıllarda araştırılan birçok ADÜ yer seçimi probleminin ve araştırmanın verilerini oluşturmuştur. Sık kullanılan bir diğer veri seti de ilk olarak Ernst ve Krishnamoorty (1996) tarafından kullanılan Avustralya Posta (AP) veri setidir. AP, Sydney şehrinde 200 posta bölgesinin yer aldığı düğümleri ve düğümler arasındaki akış miktarlarının yer aldığı veri setidir. CAB ve AP veri setlerini birbirinden farklı kılan özellik ise CAB veri setinin akış miktarlarının simetrik olması ancak AP veri setinin akış miktarlarının simetrik olmamasıdır. Son veri seti ise günümüze en yakın olan Tan ve Kara (2007) ve Yaman vd. (2007) tarafından kullanılan Türkiye veri setidir. Türkiye veri setinde ise 81 il talep merkezi olarak gösterilir. İl uzaklıkları için gerçek veriler elde edilmiş olup ürün akışları için de Türkiye Posta Telgraf Telefon (PTT) veri setinden yararlanılarak ortalama değerler alınmıştır. Açıklaması yapılan 3 veri seti de Yöneylem Araştırma Kütüphanesinde yer almaktadır (OR Library-Beasley, 1990).

Campbell (1994a) ADÜ problemini telekomünikasyon, bilgisayar sistemleri ve ulaşım konularını dahil ederek kapsamlı bir çalışma olarak ele almıştır. O’Kelly ve Miller (1994) standart ADÜ yerleşim probleminin varsayımlarını biraz esneterek, gerçek sorunları incelemişlerdir. Klincewicz (1998) yer seçiminde telekomünikasyon, bilgisayar sistemlerini ve ulaştırma konularını kapsayan bir çalışma yapmıştır. O’Kelly (1998) çalışmasında havayolu yolcu ve havayolu kargo taşımacılığını incelemiş ve aradaki bazı farklı özellikleri incelemiştir. Bryan ve O’Kelly (1999) hava taşımacılığındaki farklı ADÜ ağları üzerine çalışılmış problemleri incelemiş ve analiz etmişlerdir. Son yapılan çalışmalarda ise Alumur ve Kara (2008) ADÜ problemlerini inceleyip 4 sınıfa ayırmıştır; p-ADÜ medyan, sabit maliyetli ADÜ belirleme, p-ADÜ merkez ve ADÜ kapsama problemi. Bu 4 problem çeşidi dışında kalan problemleri ise diğer problemler olarak incelemişlerdir. Farahani vd. (2013) ele aldıkları çalışmada problemlerin modellerini ve modellerin uygulamalarını, sınıflandırmalarına yer vermişlerdir.

p-ADÜ merkez problemi p-Merkez problemi gibi darboğaz (En Küçük-En Büyük) türünde bir problemdir. p-ADÜ merkez problemi, açılacak ‘p’ tane ADÜ sayısının hangi

düğömlere atanacağını, ve talep merkezlerinin bu ADÜ'lere olan en büyük uzaklıkların en küçüklenmesi problemidir. Bu çalışmada ele alınan problemde stratejik olarak yönetim kolaylığı sağlaması açısından genellikle tek atamalı problem tipinin olduğu literatür araştırmalarına yer verilmiştir.

Literatürde tek atamalı p-ADÜ merkez problemi ile ilgili ilk çalışma ve matematiksel model Campbell (1994b) tarafından çalışılmıştır. Campbell (1994b) çalışmasında p-ADÜ merkez problemini üç farklı şekilde tanımlamıştır.

1-) Herhangi bir kaynak-varış noktası arasındaki taşıma maliyetinin en küçüklenmesi,

2-) Herhangi bir tek bağlantıdaki (kaynak noktasından ADÜ'ye, ADÜ'den diğer ADÜ'ye, ADÜ'den varış noktasına) akış için en büyük maliyetin en küçüklenmesi,

3-) Bir ADÜ'yle kaynak/varış noktası arasındaki akışın en büyük hareket maliyetinin en küçüklenmesi.

Campbell (1994b), çalışmasında p-ADÜ merkez problemlerinin üç tipinde tek atamalı ve çok atamalı versiyonlarının matematiksel modellerine yer vermiştir.

Kara ve Tansel (2000) tek atamalı p-ADÜ merkez problemi için çeşitli matematiksel modeller sunmuşlardır. Çalışmada Campbell'in (1994b) 1. tip modelinin doğrusallaştırılması için yeni yaklaşımlar önermişler ve yeni bir model sunmuşlardır. Ek olarak p-ADÜ merkez probleminin NP-zor olduğunu kanıtlamışlardır.

Kara ve Tansel (2001) problem için bir takım yeni kısıtlar eklemişlerdir. Ele aldıkları probleme en geç ulaşımli ADÜ belirleme problemi (the latest arrival hub location) adını vermişlerdir. Ele alınan problemde, bir ADÜ'ye ürün getirecek uçakların tamamı o ADÜ'ye ulaşmadan kalkış yapması gereken hiçbir uçak hareket edemez kısıtı yer almaktadır. Ancak Wagner (2004), Kara ve Tansel'in (2001) ele aldıkları problemde en büyük maliyetin/zamanın en küçüklenmesi problemlerinde ADÜ'lerde bekleme zamanı kısıtı olmadığından bu problemin p-ADÜ merkez problemi olmadığını göstermiştir.

Ernst vd. 2002 yılında, çalışma makalesinde tek atamalı p-ADÜ merkez problemi için yeni bir formülasyon geliştirdi. Aynı formülasyon ve çözüm tekniklerini 2009 yılında yayınlanmıştır. Yazarlar ' r_k ' (' k ' ADÜ'sünün yarıçapı) adını verdikleri, ' k ' ADÜ'sü ve

‘ k ’ ADÜ’süne atanan talep noktaları arasındaki maksimum toplama/dağıtma maliyeti/mesafesi anlamına gelen yeni bir değişken tanımlamışlardır. Modeli CAB ve AP veri setini kullanarak test etmişlerdir. Ernst vd. (2009) önerdikleri model ile Kara ve Tansel’in (2000) önerdiği model karşılaştırıldığında çözüm süresi bakımından Ernst vd. (2009) tarafından önerilen modelin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Campbell vd. (2007) p-ADÜ merkez probleminin tek ve çok atamalı türlerinin bazı çeşitleri için polinom zamanda çözüm bulunabileceğini göstermiştir.

Meyer vd. (2009), tek atamalı p-ADÜ merkez probleminin çözümü için iki adımlı bir algoritma üzerine çalışmışlardır. İlk adımda en iyi ADÜ yerlerini bulmak için dal-sınır algoritmasını kullanmış, ikinci adımda ise talep merkezlerinin hangi ADÜ’lere atanacağını belirlemişlerdir. İyi bir üst sınır elde edebilmek için ise karınca kolonisi algoritmasını kullanmışlardır.

Yaman ve Elloumi (2012) yıldız yerleşimini esas alan bir p-ADÜ merkez problemi üzerine çalışmışlardır. Yıldız yerleşiminde bir adet ADÜ merkezi bulunmakta ve ‘ p ’ adet ADÜ bu ADÜ merkezine bağlanmaktadır. Talep noktaları ise ‘ p ’ adet ADÜ’ye bağlanmaktadır. Ele alınan problemin çözümü için ise iki karma tamsayılı programlama metodu kullanmışlardır.

Bashiri vd. (2013) ise problemi bulanık olarak modellemiştir. Problemin çözümü için ise melez bir genetik algoritma kullanmışlardır.

p-ADÜ merkez problemi (1. tip) için önerilen 4 indisli temel formülasyon *Model-2.1’de* yer almaktadır.

Karar Değişkenleri

$$x_{ijkm} =$$

$$\begin{cases} 1, & i \text{ noktasından } j \text{ noktasına giden akış } k \text{ ve } m \text{ ADÜ'lerini kullanıyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & k \text{ eğer bir ADÜ ise} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

$$c_{ij} = i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne olan bir birim akışın maliyeti}$$

$$c_{ijkm} = c_{ik} + c_{mj} + \alpha c_{km}$$

Model-2.1:

$$\text{Enk } Z = \text{Enb } \{x_{ijkm} c_{ijkm}\}$$

$$\sum_k y_k = p \quad (2.1)$$

$$0 \leq y_k \leq 1 \quad \forall k \in N, \quad (2.2)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1 \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.3)$$

$$\sum_k \sum_m x_{ijkm} = 1 \quad \forall i \in N, j \in N, \quad (2.4)$$

$$x_{ijkm} \leq y_k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.5)$$

$$x_{ijkm} \leq y_m \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N. \quad (2.6)$$

p-ADÜ merkez formülasyonundaki amaç fonksiyonu, kaynak-varış noktaları arasındaki en büyük taşıma maliyeti değerinin en küçüklenmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.1) açılacak ADÜ sayısının ' p ' olacağını gösterir. Kısıt (2.2) ' y_k ' değişkeninin 0 veya 1 olmasını sağlar. Kısıt (2.3) ' x_{ijkm} ' değişkeninin alacağı değerlerin sınırlamasını gösterir. Kısıt (2.4) ise, her bir kaynak-varış çifti için akışın ADÜ çifti yoluyla yönlendirilmesini sağlar. (2.5) ve (2.6) kısıtları, akışların ADÜ olan konumlar üzerinden yönlendirilmesini sağlar.

p-ADÜ merkez problemi (2. tip) için önerilen 4 indisli 2. temel formülasyon *Model-2.2'de* sunulmuştur.

Karar Değişkenleri

$x_{ijkm} = i$ noktasından j noktasına gitmekte olan akışın k ve m ADÜ'lerini kullanım oranı

$$y_k = \begin{cases} 1, & k \text{ eğer bir ADÜ ise} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

$c_{ij} = i$ düğümünden j düğümüne olan bir birim akışın maliyeti

Model-2.2:

$$\text{Enk } Z = \text{Enb } \{ (c_{ik}, c_{mj}, \alpha c_{km}) x_{ijkm} \}$$

$$\sum_k y_k = p \quad (2.1)$$

$$0 \leq y_k \leq 1 \quad \forall k \in N, \quad (2.2)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1 \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.3)$$

$$\sum_k \sum_m x_{ijkm} = 1 \quad \forall i \in N, j \in N, \quad (2.4)$$

$$x_{ijkm} \leq y_k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.5)$$

$$x_{ijkm} \leq y_m \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N. \quad (2.6)$$

Model-2.2'nin amaç fonksiyonunda tek bağlantıdaki akışların en büyük maliyetinin en küçüklenmesini sağlamaktadır. Ek olarak modelde yer alan kısıtlar *Model-2.1*'deki kısıtlarla özdeştir.

Bu bölümde yer alan iki formülasyon da ADÜ'ler arasındaki akışın 0 olamayacağını ($\alpha \neq 0$) varsaymaktadır. Ancak modeller, belirli kaynak-varış noktaları arasında akışın 0 olmasına izin vermektedir.

p-ADÜ merkez problemi Ernst vd. (2009) tarafından önerilen ' r_k ' adını verdikleri değişkenin yer aldığı 2 indisli formülasyon *Model-2.3*'te verilmiştir.

Karar Değişkenleri

$r_k = k$ ADÜ'sünün yarıçapı

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümü } k \text{ ADÜ'süne atanıyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

c_{ik} : i ve k düğümü arasındaki uzaklık

Model-2.3:

$$\text{Enk } Z = \text{Enb } (r_k + r_l + \alpha c_{kl}) \quad \forall k \in N, l \in N,$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2.7)$$

$$\sum_k x_{kk} = p \quad (2.8)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.9)$$

$$r_k \geq c_{ik} x_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.10)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.11)$$

$$r_k \geq 0 \quad \forall k \in N. \quad (2.12)$$

Modelin amaç fonksiyonu, ADÜ yarıçapını kullanarak herhangi iki düğüm arasındaki en büyük maliyetin en küçüklenmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.7) her düğümün yalnızca bir ADÜ'ye atanmasını sağlarken kısıt (2.8) açılacak ADÜ sayısını ' p ' olarak belirler. Kısıt (2.9) atamaların sadece ADÜ'lere yapılmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.10), ' i ' düğümü eğer ' k ' düğümü ADÜ ise atanmasını ve ' i ' düğümünün ' k 'nın yarıçapını geçmeyecek şekilde atanmasını garantiler. Kısıt (2.11) ' x_{ik} ' değişkeninin 0-1 tamsayıli değişken olduğunu, kısıt (2.12) ise ' r_k ' değişkeninin pozitif bir değişken olduğunu göstermektedir.

ADÜ kapsama problemi, açılacak ADÜ'lerin yerleştirilmesini ve ADÜ açma maliyetleri en küçüklenirken tüm düğüm noktalarının kapsanacak şekilde ADÜ'lere atanmasını sağlamaktadır (Alumur, 2009).

Campbell (1994b) ADÜ kapsama problemi için literatürde yer alan ilk karma tamsayıli matematiksel modeli sunmuştur. Campbell (1994b) çalışmasında problem için 3 farklı kapsama kriteri ele almıştır:

1-) ' k ' ve ' m ' yolu üzerinden ' i ' düğümünden ' j ' düğümüne giden akışın maliyeti belirlenen bir değeri geçmezse,

2-) ' k ' ve ' m ' yolu üzerinden ' i ' ile ' j ' arasındaki her bağlantının maliyeti belirlenen bir değeri geçmezse,

3-) Her kaynak noktası-ADÜ ve ADÜ-varış noktası bağlantısı için ayrı belirlenmiş değerlerle karşılaştırılırsa kaynak-varış noktası çifti ($i-j$) ' m ' ve ' k ' ADÜ'leri tarafından kapsanır.

Kara ve Tansel (2003) literatürde yer alan karesel modeli 3 farklı şekilde doğrusallaştırmış ve yeni bir model önermiştir. Önerdikleri modelin diğer modellerden

daha iyi çözümler sunduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak çalışmada ADÜ kapsama probleminin NP-zor yapıda olduğu da ispatlanmıştır.

Ernst vd. (2005), tek atamalı ADÜ kapsama problemi için yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model Kara ve Tansel (2003) tarafından sunulan modeli biraz daha geliştirilmişlerdir. İki modelin çözüm süreleri karşılaştırıldığında Ernst vd. (2005) tarafından güçlendirilen yeni modelin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Hamacher ve Meyer (2006) ADÜ kapsama probleminin çeşitli formülasyonlarını karşılaştırdıkları bu çalışmada ek olarak p-ADÜ kapsama problemi ile p-ADÜ merkez problemi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Wagner (2008) ADÜ kapsama probleminin iki türü için de yeni matematiksel modeller önermiştir. Tek atamalı ADÜ kapsama problemi için önerdikleri matematiksel modelde Kara ve Tansel'in (2003) önerdikleri formülasyondan daha az kısıt ve değişken sayısı elde edildiği gözlenmiştir.

Çalık vd. (2008) ise problem için yeni bir tamsayılı model önermiştir. Yazarlar çalışmada modelin çözümü için tabu arama algoritması kullanmışlardır.

Mohammadi vd. (2011) problemi ilk defa M/M/C kuyruk modeli olarak sunmuşlardır. Problem çözümünde ise genetik algoritma ve iki metasezgisel kullanmışlardır. Problem çözümleri karşılaştırılmıştır.

Karimi ve Bashiri (2011) kapsama probleminin iki türü içinde matematiksel modeller sunmuşlardır. Problemi, Türkiye veri setinde ve İran havaalanlarında iki sezgisel yöntem kullanarak çözmüşlerdir.

Hwang ve Lee (2012) ise tek atamalı ADÜ kapsama problemini kapasite kısıtı olmayacak şekilde incelemiştir. Problemin çözümü için ise iki sezgisel yöntem önermişlerdir.

Tek atamalı p-ADÜ kapsama problemi için tanımlanmış karar değişkenleri, parametreler ve 4 indisli temel formülasyon *Model-2.4*'te sunulmuştur.

Karar değişkenleri

$$V_{ijkm} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ ve } m \text{ ADÜ'leri kaynak – varış noktası çiftlerini kapsıyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

x_{ijkm} = i orjininden j merkezine k ve m ADÜ'leri gönderim oranı

$$y_k = \begin{cases} 1, & k \text{ eğer bir ADÜ ise} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

F_k = k düğümüne ADÜ kurma maliyeti

Model-2.4:

$$\text{Enk } Z = \sum_k F_k y_k$$

$$x_{ijkm} \leq y_k \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.5)$$

$$x_{ijkm} \leq y_m \quad \forall i \in N, j \in N, k \in N, m \in N, \quad (2.6)$$

$$\sum_k \sum_m V_{ijkm} x_{ijkm} \geq 1 \quad \forall i \in N, j \in N. \quad (2.13)$$

$$0 \leq y_k \leq 1 \quad \forall k \in N, \quad (2.2)$$

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu ADÜ açma maliyetinin en küçüklenmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.2), (2.5) ve (2.6) *Model-2.1*'deki kısıtlarla özdeştir. Kısıt (2.13) her kaynak-varış noktası çiftinin bir kere atanmasını sağlamaktadır.

' k ' düğümüne ADÜ açmanın sabit maliyeti ' F_k ', eğer bütün ADÜ'ler için aynı değeri alıyorsa bu problem en az sayıda ADÜ açma problemine dönüşür.

Tüm kaynak-varış noktası çiftlerini kapsama maliyeti belirtilen sınırdan yüksekse iki şekilde çözülebilir. 1. seçenek kaynak-varış noktası çiftlerinin bazılarını bırakmak, 2. seçenek ise belirlenen sınır değerinin biraz gevşetilmesidir.

Ernst'in p -ADÜ merkez için önerdiği modelin 2 indisli p -ADÜ kapsama probleminin modeline çevrilmiş hali, karar değişkenleri ve parametreler *Model-2.5*'te yer almaktadır.

Karar Değişkenleri

r_k = k ADÜ'sünün yarıçapı

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümü } k \text{ ADÜ'süne atanıyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

c_{ik} : i ve k düğümü arasındaki uzaklık

F_k = k düğümüne ADÜ kurma maliyeti

β = Kapsama uzaklığı

Model-2.5:

$$\text{Enk } Z = \sum_k F_k x_{kk}$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2.7)$$

$$\sum_k x_{kk} = p \quad (2.8)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.9)$$

$$r_k \geq c_{ik} x_{ik} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.10)$$

$$r_k + r_m + \alpha c_{km} \leq \beta \quad \forall k \in N, m \in N, \quad (2.14)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in N, \quad (2.11)$$

$$r_k \geq 0 \quad \forall k \in N. \quad (2.12)$$

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu ADÜ açma maliyetinin en küçük olmasını sağlamaktadır. Modelde yer alan (2.7)-(2.12) kısıtları *Model-2.3* 'te yer alan kısıtlarla özdeştir. Kısıt (2.14) kısıt kapsama kısıtıdır.

ADÜ yer seçim problemleri, her ADÜ çiftinin birbiriyle doğrudan ADÜ bağlantısının olmasını gerektirir. Bu yüzden ADÜ ağında birçok ADÜ bağlantısı olmaktadır. Akışların gönderimi arasındaki bu esneklik sayesinde yeni bir araştırma alanı doğmuştur. ADÜ ağı bağlantıları tam olan ADÜ ağı tasarımı ile ADÜ bağlantılarında eksikliklere izin veren ADÜ ağı tasarımının, hizmet süresi/ maliyet bakımından hizmet kalitesi neredeyse aynı olmaktadır (Alumur vd., 2009).

Literatürde eksik bağlantılı ADÜ yer seçimi problemini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. O'Kelly ve Miller (1994) çalışmalarında ADÜ ağı tasarımında üç kritik soruyu referans alarak ilerlemişlerdir. Bu sorular;

1-) Ağdaki düğümler sadece bir ADÜ'ye mi atanmış?,

2-) Düğümler arasındaki bağlantıların ADÜ'yü yok saymasına izin veriliyor mu?,

3-) Kurulan ADÜ'ler birbirine tamamen bağlı mı?.

Yazarlar çalışmalarında bu soruları dikkate alarak, içinde eksik ADÜ ağı tasarımının da yer aldığı 8 farklı ağ tasarımını örneklendirmişlerdir.

Nickel vd. (2001) çalışmalarında kentsel toplu taşıma ağlarındaki konum sorunu hakkında model önermişlerdir. Yazarlar problemde ADÜ bağlantılarının kurulması için gerekli sabit maliyeti dikkate almışlardır. Toplam nakliye maliyetlerini ve bağlantıların kurulması için gereken sabit maliyeti en aza indirmişlerdir.

Podnar vd. (2002) ADÜ ağı tasarlama probleminde ADÜ'lerin hangi konumlara yerleştirilmesi gerektiğini incelememişlerdir. Yazarlar, daha düşük maliyeti olan bağlantıların seçildiği farklı bir ADÜ ağı tasarım problemini incelemişlerdir.

Campbell vd. (2005a;2005b) çalışmalarında ADÜ ark yerleşim problemi için geliştirdikleri modeli sunmuşlardır. Bu çalışmalar da Podnar vd. (2002) gibi ADÜ'lerin yerlerini bulmayı değil aralarındaki daha düşük bağlantı maliyetlerini bulmayı amaçlamışlardır. Çalışmada model, örnekler üzerinde test edilmiş ve optimum çözümlerine yer verilmiştir.

Alumur ve Kara (2009) ADÜ yer seçim problemini kargo sektörüne uygulamış ve tek atamalı eksik bağlantılı ADÜ ağ tasarımı problemiyle ilgili bir rota üzerinde en fazla üç ADÜ'ye uğranabilen bir matematiksel model önermiştir. Model, Türkiye ve CAB veri setlerinde uygulanmıştır.

Çalık vd. (2009) ise tek atamalı eksik bağlantılı ADÜ ağ tasarımı problemini ele almışlardır. Problem çözümü için tabu arama tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Çözüm yöntemini ise Türkiye ve CAB veri setlerinde test etmişlerdir.

Alumur vd. (2009) çalışmalarında ADÜ konum problemlerini tek atamalı eksik bağlantılı ağ tasarımı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada tek atamalı; eksik bağlantılı p-ADÜ medyan, sabit maliyetli eksik bağlantılı ADÜ yer seçimi, eksik bağlantılı p-ADÜ merkez ve eksik bağlantılı ADÜ kapsama ağ tasarım problemleri için matematiksel modeller sunulmuştur. Modeller CAB ve Türkiye veri setlerinde test edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Alumur vd. (2012) literatürde yer alan ADÜ konum ve tahsis kararlarına ek olarak farklı ulaşım modlarının kullanıldığı bir ADÜ ağı tasarımı problemini çalışmışlardır. Bu

problemde genelde ayrı ayrı incelenen ulaşım maliyeti ve seyahat süreleri birlikte değerlendirilmiştir. Problem çözümü için karma tamsayılı bir programlama modeli geliştirilmiş olup model Türkiye ve CAB veri setlerinde test edilmiştir.

Serper ve Alumur (2016) farklı ulaşım modellerinin ve farklı araç tiplerinin dikkate alındığı bir ADÜ ağı tasarlama problemini ele almışlardır. Problem, ADÜ'lerin konumlarının ve kapasitelerinin, ADÜ olmayan düğümlerin hangi ADÜ'lere atanacağını, ADÜ'lerde hangi ulaşım şeklinin kullanılacağını ve ADÜ ağında kullanılacak araç türlerinin sayısının bulunmasını amaçlamaktadır. Çalışmada karışık tamsayılı bir model geliştirilmiştir. Problem çözümü için de değişken bir komşu arama algoritması önerilmiş olup algoritma da eksik bağlantılı ADÜ ağı tasarımına izin verilmektedir. Algoritma, CAB ve Türkiye veri setlerinde uygulanmıştır.

Eksik bağlantılı p-ADÜ merkez problemi, p-ADÜ merkez problemi gibi herhangi bir kaynak-varış noktası çiftinin arasındaki en büyük seyahat süresinin/ taşıma maliyetinin en küçüklenmesini ele alırken hangi ADÜ linklerinin kurulacağını da belirlemektedir.

Alumur vd. (2009) tek atamalı eksik bağlantılı p-ADÜ merkez problemi için geliştirdikleri 3 indisli matematiksel modele yer vermişlerdir. Matematiksel model (*Model-2.6*), modelin karar değişkenleri ve parametreler sunulmuştur. Matematiksel modelde 'n' talep düğümünden oluşan küme "N", potansiyel ADÜ olan düğümlerin oluşturduğu küme "H" olarak adlandırılmıştır.

Karar Değişkenleri

$$y_{ijk} =$$

$$\begin{cases} 1, & \text{eğer kapsayan ağaç } k \text{ ADÜ'sünden başlayarak } i \text{ ve } j \text{ ADÜ'lerini ziyaret ediyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

β = Herhangi bir kaynak-varış noktası çifti arasındaki en büyük seyahat süresi

r_j = ADÜ j 'ye atanan düğümler ve ADÜ j arasındaki en büyük servis süresi

d_{ij} = ADÜ ağında i ADÜ'sünden j ADÜ'süne seyahat süresi

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümü } j \text{ düğümdeki ADÜ'ye atanırsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, i \text{ ve } j \text{ ADÜ'leri arasında bir link kurulursa} \\ 0, \text{ d. d.} \end{cases}$$

Parametreler

t_{ij} = i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi

α^l = ADÜ'ler arası ulaşım süresi indirim katsayısı

p = kurulacak ADÜ sayısı

q = Kurulacak ADÜ link sayısı

Model-2.6:

$$\sum_{k \in N} z_{kj} = \beta$$

$$\sum_{j \in H} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2.15)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.16)$$

$$z_{ij} \leq x_{ii} \quad \forall i \in N, j \in H: i < j, \quad (2.17)$$

$$z_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in N, j \in H: i < j, \quad (2.18)$$

$$\sum_{j \in H} x_{jj} = p \quad (2.19)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in H: j > i} z_{ij} = q \quad (2.20)$$

$$\sum_{i \in H: i \neq j} y_{ijk} \geq x_{kk} + x_{jj} - 1 \quad \forall j \in N, k \in H: j \neq k, \quad (2.21)$$

$$\sum_{i \in H: i \neq j} y_{ijk} \leq x_{kk} \quad \forall j \in N, k \in H: j \neq k, \quad (2.22)$$

$$y_{ijk} + y_{jik} \leq z_{ij} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i < j, \quad (2.23)$$

$$d_{kj} \geq (d_{ki} + t_{ij})y_{ijk} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i \neq j, j \neq k, \quad (2.24)$$

$$d_{ij} = d_{ji} \quad \forall i \in N, j \in H: i \neq j, \quad (2.25)$$

$$d_{kk} = 0 \quad \forall k \in H, \quad (2.26)$$

$$r_j \geq t_{ij}x_{ij} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.27)$$

$$r_k + \alpha^l d_{kj} + r_j \leq \beta \quad \forall j \in N, k \in H, \quad (2.28)$$

$$x_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.29)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i \neq j, j \neq k, \quad (2.30)$$

$$d_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in N, j \in H. \quad (2.31)$$

Amaç fonksiyonu herhangi bir kaynak-varış noktası çifti arasındaki en büyük seyahat süresinin en küçük olmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.15), problem tek atamalı olduğu için her ‘*i*’ kaynak noktasının sadece bir ADÜ’ye atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.16) ise ‘*i*’ kaynak noktasının, ‘*j*’ düğümünde ADÜ kurulmadan atanamayacağını belirtir. (2.17) ve (2.18) kısıtları ise bir ADÜ linkinin sadece bu linkin iki uç düğümünün de ADÜ olduğu durumlarda kurulmasını sağlamaktadır. Kısıt (2.19) ve (2.20), ‘*p*’ sayıda ADÜ ve ‘*q*’ sayıda ADÜ linki kurulacağını göstermektedir. Kısıt (2.21) ADÜ ağına birden fazla ADÜ’nün kurulacağı durumda her ADÜ düğümü için kurulacak link sayısının en az 1 olmasını sağlar. Bu şekilde her ADÜ, bir link için bile olsa bir uç düğüm olmuş olur. Kısıt (2.22) ‘*k*’ ADÜ’sünden çıkan kapsayan ağacın en fazla bir diğer ADÜ düğümüne girmesini ve kapsayan ağacın ADÜ olmayan düğümlerde 0 olmasını garantiler. Kısıt (2.23) ise kapsayan ağacın arklarının ADÜ arkları olmasını sağlar. Kısıt (2.24) bir ADÜ’den diğer ADÜ’ye kapsayan ağacın yerleştirilmiş arkları üzerinden gidiş süresini hesaplar. Kısıt (2.25) uzaklıkların simetrik olmasını sağlamaktadır. Kullanılan uzaklık matrisi simetrik olduğundan, ‘*i*’ düğümünden ‘*j*’ düğümüne gitmekle ‘*j*’ düğümünden ‘*i*’ düğümüne gidişin eşit olduğunu ifade etmektedir. Kısıt (2.26) bir düğümün kendisine olan uzaklığının 0 olduğunu göstermektedir. Bir düğümden, atanmış olduğu ADÜ’ye; ADÜ’nün yarıçapına kadar gereken en büyük seyahat süresi her ADÜ için kısıt (2.27) ile hesaplanır. Bir ADÜ’nün yarıçapı, kendisine atanan en uzak düğüme olan uzaklığıyla hesaplanır. Bu durum kısıt (2.27)’de yer almaktadır. Kısıt (2.28) ağdaki herhangi iki düğüm arasındaki seyahat süresinin ‘*β*’ değerinden küçük olmasını sağlamaktadır. Burada ayrıca indirim katsayısının ADÜ’ler arasındaki uzaklıkları da etkileyeceği tahmin edilmektedir.

Tek atamalı eksik bağlantılı ADÜ kapsama ağ tasarım problemi, ADÜ’lerin yerlerini, ADÜ olmayan düğümlerin ADÜ’lere atanmasını ve hangi ADÜ linklerinin kurulması gerektiğinin kararını, belirli bir süreyi geçmeyecek şekilde veren ve bunu yaparken de ADÜ ağı tasarlama maliyetini de en küçükleyen modeldir.

Alumur vd. (2009) eksik bağlantılı ADÜ kapsama problemi için 3 indis kullanarak geliştirdikleri matematiksel modele yer vermişlerdir. 3 indisli matematiksel modele (*Model-2.7*), karar değişkenleri ve parametreleri sunulmuştur.

Karar Değişkenleri

$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer kapsayan ağaç } k \text{ ADÜ'sünden başlayarak } i \text{ ve } j \text{ ADÜ'lerini ziyaret ediyorsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$

$r_j = \text{ADÜ } j \text{'ye atanan düğümler ve ADÜ } j \text{ arasındaki en büyük servis süresi}$

$d_{ij} = \text{ADÜ ağında } i \text{ ADÜ'sünden } j \text{ ADÜ'süne seyahat süresi}$

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümü } j \text{ düğümdeki ADÜ'ye atanırsa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$

$z_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ ve } j \text{ ADÜ'leri arasında bir link kurulursa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$

Parametreler

$FH_j = j \text{ düğümüne ADÜ kurulmasının sabit maliyeti}$

$FL_{ij} = i \text{ ve } j \text{ ADÜ'lerinin arasında kurulacak linkin sabit maliyeti}$

$\beta = \text{En büyük servis süresi gereksinimi}$

$t_{ij} = i \text{ ve } j \text{ düğümleri arasındaki seyahat süresi}$

$\alpha^l = \text{ADÜ'ler arası ulaşım süresi indirim katsayısı}$

Model-2.7:

$$\text{Enk } Z = \sum_{i \in H} \sum_{j \in H: j > i} FL_{ij} z_{ij} + \sum_{k \in H} FH_k x_{kk}$$

$$\sum_{j \in H} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2.15)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.16)$$

$$z_{ij} \leq x_{ii} \quad \forall i \in N, j \in H: i < j, \quad (2.17)$$

$$z_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in N, j \in H: i < j, \quad (2.18)$$

$$\sum_{i \in H: i \neq j} y_{ijk} \geq x_{kk} + x_{jj} - 1 \quad \forall j \in N, k \in H: j \neq k, \quad (2.21)$$

$$\sum_{i \in H: i \neq j} y_{ijk} \leq x_{kk} \quad \forall j \in N, k \in H: j \neq k, \quad (2.22)$$

$$y_{ijk} + y_{jik} \leq z_{ij} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i < j, \quad (2.23)$$

$$d_{kj} \geq (d_{ki} + t_{ij})y_{ijk} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i \neq j, j \neq k, \quad (2.24)$$

$$d_{ij} = d_{ji} \quad \forall i \in N, j \in H: i \neq j, \quad (2.25)$$

$$d_{kk} = 0 \quad \forall k \in H, \quad (2.26)$$

$$r_j \geq t_{ij}x_{ij} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.27)$$

$$r_k + \alpha' d_{kj} + r_j \leq \beta \quad \forall j \in N, k \in H, \quad (2.28)$$

$$x_{ij}, z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in H, \quad (2.29)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in H: i \neq j, j \neq k, \quad (2.30)$$

$$d_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in N, j \in H. \quad (2.31)$$

Amaç fonksiyonu eksik bağlantılı bir ADÜ ağı kurmanın toplam maliyetini en aza indirmektedir. Amaç fonksiyonunda yer alan ilk terim ADÜ linki kurmanın toplam maliyetini, ikinci terim ise kurulacak ADÜ'lerin toplam maliyetini ifade etmektedir. Görüldüğü üzere *Model-2.7*'de yer alan kısıt (2.15)-(2.18), (2.21)-(2.31) *Model-2.6*'daki kısıtlarla özdeştir.

ADÜ yer seçim problemlerinin birçoğunda talep noktalarıyla ADÜ'ler arasında doğrudan bağlantı olduğu varsayılmaktadır. Her ADÜ-talep noktası linki için farklı araçların kullanılması araç maliyetinin fazla olmasına ve trafik sıkışıklığına sebep olabilmektedir. Ancak doğru bir araç rotalama sayesinde, bir aracın birkaç düğümü ziyaret ederek ADÜ'ye gitmesi araç maliyetlerinin ve trafik sıkışıklığının azalmasını sağlayacaktır (Kartal vd., 2019).

ADÜ yer seçimi ve rotalama problemi, kaç tane ADÜ'nün açılacağı ve bu ADÜ'lerin konumlarının neresi olduğunu, belirlenen araçların hangi rotayı takip etmesi gerektiğinin bulunduğu ve toplam taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi sağlanan bir problemidir.

Literatürde bu konuyla ilgili az sayıda çalışma yer almaktadır. Bu konu üzerine yapılan ilk çalışma Nagy ve Salhi'ye (1998) aittir. Yazarlar, ADÜ kurmak, kaynak-varış

noktası arasındaki rotayı belirlemek için çeşitli kısıtları dikkate aldılar. Problemin çözümü için ise karışık tamsayılı bir model geliştirmişlerdir.

Bruns vd. (2000) çalıştıkları problem İsviçre'deki posta dağıtım hizmetini yeniden tasarlamayı içermektedir. Problemin amacı kurulacak ADÜ sayısını ve yerlerini, talep düğümlerinin hangi ADÜ'lere atanacağını belirlemektir.

Wasner ve Zapfel (2004) Avusturya'da kargo dağıtım şirketlerinin yer aldığı bir ağ yapısında, araçların toplama ve dağıtım rotalarını belirlemişlerdir. Çalışmada ADÜ'ler arasındaki taşımacılık merkez bir ADÜ üzerinden yönlendirilmektedir. Model depoların ve ADÜ'lerin yerlerini, talep merkezlerinin hangi ADÜ'ye atanacağını ve depolar arasındaki araç rotalarını dikkate almıştır. Model kurulurken önce teslim alma sonra dağıtım politikası ve depolar arasında doğrudan taşımacılığın olduğu varsayılmıştır. Yazarlar problem için doğrusal olmayan karışık tamsayılı model önermişlerdir.

Çetiner vd. (2010) Türkiye veri setinde çok atamalı ADÜ yer seçimi ve araç rotalama problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada akışlar eşzamanlı toplanmış ve dağıtılmıştır.

Camargo vd. (2013) tek atamalı ADÜ yer seçimi ve araç rotalama problemlerine benzer bir problem üzerine çalışmıştır. Literatürde yer alan diğer çalışmalarla arasındaki fark ise kurulacak ADÜ sayısının yazarlar tarafından belirlenmiş olmasıdır. Yazarlar, her bir ADÜ'nün yalnızca bir araçtan hizmet alabileceğini ve bir aracın ziyaret edebileceği ADÜ sayısında bir sınır olduğunu varsayılmıştır.

Kartal vd. (2017) eş zamanlı toplama ve dağıtım içeren tek atamalı p-ADÜ medyan ve rotalama problemini çalışmışlardır. Problemin amacı taşıma maliyetini ve ağdaki ve ADÜ'ler arasındaki akışın rotalanması maliyetlerinin en küçüklenmesidir.

Rieck vd. (2014) ADÜ tesislerinin açılması ve araç rotalama probleminin üzerine çalışmışlardır. Problem çözümü için karma tamsayılı doğrusal bir model önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında literatüre ilk olarak Kartal ve Ernst (2015) tarafından p-ADÜ merkez problemine ait sunulan matematiksel modellerle aynı amaç fonksiyonuna sahip, ancak ADÜ yerlerinin belirli olduğu varsayımı altında 4 indisli yeni bir matematiksel model sunulmuştur.

İzleyen bölümde literatüre yeni sunulan “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli p-ADÜ Merkez ve Rotalama problemi”, probleme ait matematiksel model, simetri bozma kısıtı, geçerli eşitsizlikler ve sayısal sonuçları sunulmaktadır.



3. TEK ATAMALI SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA PROBLEMİ

Bu bölümde literatüre yeni sunulan 4 indisli “ Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi (SADÜMRP)” ele alınacaktır. Bölüm 3.1’de problemin tanıtımı, matematiksel modeli, Bölüm 3.1.1.’de modelin çözüm süresinin hızlanmasını sağlayan simetri bozma kısıtı ve Bölüm 3.1.2’de problem için geliştirilmiş olan bir geçerli eşitsizlik verilmiştir. Bölüm 3.2’de ise önerilen modele ilişkin sayısal sonuçlar sunulmuştur.

3.1. Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi

Günümüzde ADÜ yerlerinin belirlenmesi çok maliyetli olduğu için şirketler tarafından alınan uzun dönemli stratejik kararlardır. Dolayısıyla, lojistik firmalarının işleyişi incelendiğinde ADÜ’lerin belirli yerlerde kurulmuş olduğundan, ele alınacak problemlerde ADÜ yerlerinin önceden bilindiği varsayılmaktadır. Ek olarak talep merkezlerinin ADÜ’lere atanması taktik seviyede bir kararken, araçların rotalarının oluşturulması operasyonel seviyede ve günlük olarak değişime uygun kararlardır. Dayanıksız/zamana duyarlı ürünler taşıyan firmalar ya da kargo şirketleri için talep merkezlerinin hangi ADÜ’lere atanacağı kararı ve rotalama kararlarının belirli bir zaman kısıtına göre planlanması gerekmektedir. Bu çalışmadaki öncelikli amaç, dayanıksız/zamana duyarlı ürün taşıyan firmalar ya da kargo şirketleri için ‘i-j’ düğümleri arasındaki en büyük mesafenin en küçük olmasını sağlamaktır. Bu şekilde ürünün zamanında teslim edilip edilemeyeceği hakkında fikir yürütülebilmektedir. Önerilen modelin karar vericilerin/yöneticilerin kararlarında yol gösterici olması beklenmektedir.

Anlatılanlardan hareketle bu çalışmada, literatürde ilk defa yer alacak, ADÜ yerlerinin belirli olduğu varsayımıyla SADÜMRP için karma tamsayılı 4 indisli matematiksel programlama formülasyonu ve matematiksel model üzerinde yapılan test sonuçları sunulmuştur.

Önerilen matematiksel model ‘n’ talep düğümünden oluşan küme “N”, ADÜ olan düğümlerin oluşturduğu küme “H”, ADÜ olmayan düğümlerin oluşturduğu küme “NH” olarak tariflenmiştir. Rotalarda sınırlı sayıda homojen olan ve kapasite sınırı olmayan $v \in V$ araç filosunun çalıştığı varsayılmıştır. Ele alınan matematiksel modelde, gösterim kolaylığı olması açısından her ADÜ’ye atanacak araç sayılarının bilindiği ve sabit olduğu varsayılmıştır. Ancak önerilen matematiksel modelde araç sayıları ADÜ’lere eldeki sayı

kadar verilebilmektedir. Problemden ‘ p ’ sayısı kurulacak ADÜ sayısını, ‘ α ’ ise ADÜ’den ADÜ’ye taşıma maliyeti ölçek ekonomisi-indirim faktörünü belirtmektedir. ‘ L ’ Bir aracın en fazla gezeceği şehir sayısını belirtmekte olup, “ $n-p-p*v+1$ ” formülüyle bu sayı sağlanmaktadır. Karma tamsayılı matematiksel programlama formülasyonunun geliştirilirken belirtilmek istenen; modelde Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) alt tur engelleme kısıtları (Miller vd., 1960) kullanılmasıdır. Buna göre MTZ kısıtlarında yer alan ‘ u_i ’ pozitif değişkeni alt tur oluşumunu engellemek için ADÜ’ler hariç tüm düğümlerin yalnızca bir kez ziyaret edilmesini sağlamaktadır.

4 indisli $O(n^3)$ karmaşıklığındaki SADÜMRP matematiksel modelinin karar değişkenleri, parametreleri ve kısıtları *Model-3.1*’de yer almaktadır.

Karar değişkenleri

$$collect_{kij}^v =$$

$\begin{cases} 1, k \text{ ADÜ'sünden rotasına başlayan } v \text{ aracı } i \text{ ve } j \text{ düğümlerini sırasıyla ziyaret ediyorsa} \\ 0, d. d. \end{cases}$

$$distribute_{ijk}^w =$$

$\begin{cases} 1, i \text{ ve } j \text{ düğümlerini sırasıyla ziyaret eden } w \text{ aracı turunu } k \text{ ADÜ'sünde tamamlıyorsa} \\ 0, d. d. \end{cases}$

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, v \text{ aracı rota üzerindeki } i \text{ ve } j \text{ düğümlerini sırasıyla ziyaret ederse} \\ 0, d. d. \end{cases}$$

$$h_i = \begin{cases} 1, i \text{ düğümü ADÜ ise} \\ 0, d. d. \end{cases}$$

$$z_{iv} = \begin{cases} 1, v \text{ aracı } i. \text{ ADÜ'ye atanmışsa} \\ 0, d. d. \end{cases}$$

$collect_sum_{kv} = k$ ADÜ’sünden rotasına başlayan v aracının rotasının maksimum toplama mesafesi

$distribute_sum_{iw} = i$ ADÜ’sünde rotasını tamamlayan w aracının rotasının maksimum dağıtım mesafesi

Parametreler

$$d_{ij} = i \text{ ve } j \text{ düğümleri arasındaki mesafe}$$

$$n_i = i. \text{ ADÜ'ye atanan araç sayısı}$$

p = Açılacak ADÜ sayısı

Model-3.1:

$$\text{Enk} = \text{Enb} (Z)$$

$$\sum_i h_i = p \quad (3.1)$$

$$\sum_v \sum_{j \neq i} x_{ij}^v - \sum_v z_{iv} = 1 - h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.2)$$

$$z_{iv} \leq \sum_{j \neq i, j \in NH} x_{ij}^v \quad \forall i \in H, v \in V, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in H} z_{iv} = 1 \quad \forall v \in V, \quad (3.4)$$

$$\sum_v z_{iv} = h_i * n_i \quad \forall i \in H, \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \neq i} x_{ij}^v - \sum_{j \neq i} x_{ji}^v = 0 \quad \forall i \in N, v \in V, \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \neq i, j \in NH} x_{ij}^v - 1 + h_i \leq z_{iv} \quad \forall i \in N, v \in V, \quad (3.7)$$

$$u_i - u_j + L * \sum_v x_{ij}^v + (L-2) * \sum_v x_{ji}^v \leq L - 1 \quad \forall i \in NH, j \in NH: i \neq j, \quad (3.8)$$

$$\text{collect_sum}_{kv} \geq \sum_i \sum_j (d_{ij} * \text{collect}_{kij}^v) \quad \forall k \in N, v \in V, \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in H} \text{collect}_{kij}^v = x_{ij}^v \quad \forall i \in N, j \in NH, v \in V: j \neq i, \quad (3.10)$$

$$\text{collect}_{kij}^v \leq x_{ij}^v \quad \forall i \in N, j \in NH, k \in H, v \in V, \quad (3.11)$$

$$\text{collect}_{kij}^v \leq z_{kv} \quad \forall i \in N, j \in NH, k \in H, v \in V, \quad (3.12)$$

$$\text{distribute_sum}_{iw} \geq \sum_i \sum_j (d_{ij} * \text{distribute}_{ijk}^w) \quad \forall i \in H, w \in V, \quad (3.13)$$

$$\sum_{k \in H} \text{distribute}_{ijk}^w = x_{ij}^w \quad \forall i \in NH, j \in N, w \in V: j \neq i, \quad (3.14)$$

$$\text{distribute}_{ijk}^w \leq z_{kw} \quad \forall i \in NH, j \in N, k \in H, w \in V, \quad (3.15)$$

$$\text{distribute}_{ijk}^w \leq x_{ij}^w \quad \forall i \in NH, j \in N, k \in H, w \in V: j \neq i, \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \neq i} \sum_v x_{ij}^v = 1 + (n_i - 1) * h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \neq i} \sum_v x_{ji}^v = 1 + (n_i - 1) * h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.18)$$

$$Z \geq (\text{collect_sum}_{kv} + \text{distribute_sum}_{iw} + \alpha * d_{ik}) \quad \forall i \in H, k \in H, v \in V, w \in V: i \neq k, v \neq w, \quad (3.19)$$

$$Z \geq (\text{collect_sum}_{kv} + \text{distribute_sum}_{kw}) \quad \forall k \in N, v \in V, w \in V: v \neq w, \quad (3.20)$$

$$Z \geq \sum_i \sum_{j \neq i} (d_{ij} * x_{ij}^v) - d_{kl} * x_{kl}^v - M * (1 - x_{kl}^v) \quad \forall k \in N, l \in N, v \in V. \quad (3.21)$$

$$z_{iv}, x_{ij}^v, h_i, \text{distribute}_{ijk}^w, \text{collect}_{kij}^v \in \{0,1\} \quad (3.22)$$

$$u_i, \text{collect_sum}_k, \text{distribute_sum}_{iw}, Z \geq 0 \quad (3.23)$$

Modelin amaç fonksiyonu tüm ‘i’ ve ‘j’ düğümleri arasındaki en büyük toplam mesafenin en küçüklenmesi sağlanmaktadır. Matematiksel modelde bu durumu sağlamak için kısıt (3.19), (3.20) ve (3.21) kısıtları geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonu değeri: iki düğüm arasındaki en büyük mesafe farklı ADÜ’lere atanan araçlar için maksimum toplama (*collect_sum*) ve maksimum dağıtım (*distribut_sum*) ve ADÜ’ler arasındaki mesafenin toplamına eşit olabilir. Bu durum kısıt (3.19)’da verilmiştir. Herhangi bir ‘i’ ve ‘j’ düğüm çifti arasındaki en büyük mesafe aynı ADÜ’ye atanan iki farklı araç rotasından da elde edilebilmektedir. Bu durumda bu mesafe, iki ayrı araca ait maksimum toplama mesafesi artı maksimum dağıtım mesafesi olmaktadır. Amaç fonksiyonunun bu şekilde gerçekleşmesi kısıt (3.20)’de sağlanmaktadır. Kısıt (3.21)’de ise; oluşan tasarım ağı üzerinde iki düğüm arasındaki mesafenin en uzak olabileceği durumun, tek bir rota kaynaklı olması durumu yer almaktadır. Bu kısıtta tüm rotalar için, rotanın toplam uzunluğundan o rotaya ait düğümler arasındaki en kısa mesafe çıkartılarak en uzun mesafe hesaplanmaktadır.

Kısıt (3.1), ‘p’ sayıda ADÜ açılmasını sağlamaktadır. Burada belirtilmek istenen, bu kısıt olmadan da model çalışabilmektedir. Kısıt (3.2), ‘i’ düğümünün ADÜ olması durumunda ‘v’ adet aracın bu ADÜ’ye atanmasını, ‘i’ düğümünün ADÜ olmaması durumunda ise düğümün sadece 1 araç tarafından ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.3), ‘i’ düğümünün ADÜ olması halinde ‘v’ aracının o ADÜ’ye atanmasını ve aracın ‘i’ düğümünden ‘j’ düğümüne geçmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.4), her aracın sadece bir ADÜ’ye atanmasını sağlarken, kısıt (3.5) herhangi bir ‘i’ düğümünün ADÜ olması durumunda düğüme ‘n_i’ tane aracın atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.6) ise akışın korunumu kısıtıdır; bir düğüme gelen ve düğümden çıkan araç sayısının eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.7) ile ‘z_{iv}’ değişkeninin sadece ‘i’ düğümünün ADÜ olduğu durumda değer alması sağlanmaktadır. Kısıt (3.8) alt tur engelleme kısıtıdır. Alt tur engelleme kısıtları ilk olarak klasik MTZ (Miller vd., 1960) kısıtları denenmiş ancak, şu anki formülasyonun çözüm sonuçlarını kısmen biraz daha hızlandırdığı fark edilmiş ve o yüzden MTZ’nin bu versiyonu üzerinden matematiksel programlama modeline dahil edilmiştir. Kısıt (3.9), her bir rotanın maksimum toplama (collection) mesafesini hesaplar. Kısıt (3.10) ve (3.11) birlikte, collect (toplama) değişkeni ve ‘x_{ij}^v’ arasındaki ilişkiyi

tariflemek için geliştirilmiştir. Kısıt (3.12) collect değişkenini her ADÜ'ye bir 'v' aracı atanmasını gösteren ' z_{kv} ' değişkeni ile ilişkilendirir. Kısıt (3.13) her bir rotanın maksimum dağıtım (distribution) mesafesini hesaplar. Kısıt (3.14) ve (3.15) birlikte distribute (dağıtım) değişkeni ve ' x_{ij}^v ' arasındaki ilişkiyi tariflemek için geliştirilmiştir. Kısıt (3.16) distribute değişkeninin her ADÜ'ye bir 'v' aracı atanması gerektiğini gösteren ' z_{kv} ' değişkeni ile ilişkilendirir. Kısıt (3.17) ve (3.18) birlikte, eğer 'i' düğümü bir ADÜ ise 'i' ADÜ'sünden çıkan ve 'i' düğümüne giren bağlantı sayılarının, söz konusu ADÜ'ye atanan araç sayısı ile aynı olmasını garantiler. Ayrıca bu kısıtlar, 'i' düğümünün ADÜ olmaması durumunda, 'i' düğümünü ziyaret eden 'v' aracının ' $i-j$ ' linkini yalnızca bir kez ziyaret etmesini garantilemektedir.

Bu model en kötü senaryoda $|NH|=n$, $|H|=n$ ve $|V|=v$ olduğu durumda, modelde $(2n^3v+n^2v+nv+n)$ 0-1 tamsayı değişkene, $(n+2nv)$ sürekli değişkene ve $(4n^3v+n^2v^2+3n^2v+nv^2+n^2+5nv+4n+v)$ kısıta sahiptir.

Anlatılanlardan hareketle SADÜMRP problemi düğümlerin hangi ADÜ'lere atanacağını, araçların en büyük uzaklıkları en küçükleyecek şekilde rotalanmasını sağlamaktadır.

İlerleyen iki bölümde sırasıyla karma tamsayılı matematiksel model için geliştirilen Simetri Bozma Kısıtı ve Geçerli Eşitsizlikler anlatılacaktır.

3.1.1. Simetri Bozma Kısıtı

SADÜMRP için geliştirilen karma tamsayılı matematiksel programlama modelinde araçlar aynı özelliklere (özdeş) sahip olduğundan çok fazla simetri bulunmaktadır. Burada, özdeş araçların yeniden numaralandırılması eşdeğer (simetrik) çözümlere yol açacak şekilde rotalar, çözüm uzayında tekrar tekrar oluşturulabilir. Bu yüzden, ADÜ'lerin küçükten büyüğe sıralanmasıyla birlikte, araç numaraları da küçükten büyüğe olacak şekilde ADÜ'lere atanabilirler. Böylelikle, simetri yok edildiğinde, çözüm için türetilen dal-sınır ağacı sayısında da azalmalar olacaktır. Geliştirilen simetri bozma kısıtı aşağıdaki gibidir (A):

$$z_{iv} \leq \sum_{j \leq i} z_{jv-1} \quad \forall i \in N, v \in V \setminus \{1\} \quad (A)$$

Bu kısıtın küçük bir problem üzerinde nasıl çalıştığı anlatılacak olursa: Örneğin, 8 düğümlük bir problemde, 2 ADÜ ve her ADÜ için iki aracın atandığını varsayalım. Problemin çözümü için araçlar sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 olabilir. Açılan ADÜ'ler 5. ve 8.

düğümüne yerleşsinler. Çözüm şu şekilde olabilir: 8-6-8; 5-4-7-5; 8-2-8; 5-1-3-5. Model-3.1'e eklenen simetri bozma kısıtı ile 5-1-3-5; 5-4-7-5; 8-2-8; 8-6-8 çözümleri sırasıyla verilecek, dolayısıyla düğümlerin araçlara olan atamasından kaynaklı simetriyi önemli ölçüde azaltacaktır. Dolayısıyla, ' z_{iv} ' değişkenleri, ilk durumda $z(8,1)$; $z(5,2)$; $z(8,3)$ ve $z(5,4)$ olarak karşımıza çıkmaktayken, yeni durumda $z(5,1)$; $z(5,2)$; $z(8,3)$ ve $z(8,4)$ şeklinde oluşacak ve araçların tüm ADÜ'lere tekrar tekrar atanması ve çözüm aranması durumu ortadan kalkacaktır.

Geliştirilen simetri bozma kısıtının karma tamsayılı matematiksel programlama modeli üzerindeki etkilerini incelemek için bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Simetri bozma kısıtının dahil olduğu ve olmadığı aynı karakteristiğe sahip soru örnekleri üzerinde modeller çözdürülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada yer alan bütün soru örnekler, Türkiye Posta Veri Seti (Turkish Network) üzerindeki sanayinin ve nüfusun yoğunluk sıralamasında ilk 16'da yer alan şehirler üzerinde çözdürülmüştür. Bu şehirler ise sırasıyla, 1-Adana, 2-Ankara, 3-Antalya, 4-Bursa, 5-Diyarbakır, 6-Erzurum, 7-Gaziantep, 8-Mersin, 9-İstanbul, 10-İzmir, 11-Konya, 12-Manisa, 13-Samsun, 14-Sivas, 15-Trabzon, 16-Urfa şeklindedir. Bu şehirler Yaman vd. (2007) makalesinden alınmıştır. Türkiye-16 (TR.16) veri seti için kullanılan şehirlerarası uzaklıklar Türkiye Kara Yolları'ndan alınmış, güncellenmiş verilerdir.

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, problem örneklerinde, açılacak ADÜ yerlerinin belirlenmesi stratejik bir karar olduğundan, bu merkezlerin önceden bilindiği varsayılmaktadır. Ancak bu kararlar için problem örneklerinde, ADÜ merkezlerinin diğer şehirlere olan toplam uzaklığının en küçük olması strateji olarak belirlenmiştir. Buna göre, ADÜ yerleri belirlenirken, her bir düğümün diğer düğümlere olan uzaklıkları toplanmıştır. ' p ' sayıda ADÜ merkezi; diğer düğümlere toplam mesafesi en küçük olan düğümler arasından seçilerek probleme girdi olarak verilmiştir. ADÜ yerleri modellere parametre olarak verildiği için modeller ADÜ'lere atama ve rotalama problemine dönüşmüştür.

Çalışmada yer alan tüm modeller GAMS 30.3 versiyonu ve Intel i3 (2.50 GHz) ve 4 GB Ram'a sahip bir dizüstü bilgisayar üzerinde çözülmüştür.

SADÜMRP'nin simetri bozma kısıtı dahil olmayan Türkiye $n=16$ (TR.16) veri setinde Model-3.1 ve simetri bozma kısıtının dahil olduğu *Model-3.1(A)*'nin test sonuçları

Tablo 3.1’de yer almaktadır. Tablo 3.1’deki ilk sütun ‘ α ’ ölçek ekonomisini, ikinci sütun ‘ p ’ kurulacak ADÜ sayısını, üçüncü sütun ‘ v ’ her ADÜ’ye atanan araç sayısını, dördüncü sütun ise problemlere parametre olarak girilen ADÜ yerlerini göstermektedir. Beşinci ve altıncı sütunlar *Model-3.1*’in çözüm süresi (sn) cinsinden değerleri ve dal sınır ağacı sayısını, yedinci ve sekizinci sütunlarda *Model-3.1(A)*’nın çözüm süresi (sn) cinsinden değerleri ve dal sınır ağacı sayısı, dokuzuncu sütunda ise modellerin toplam maliyet değerleri yer almaktadır.

Tablo 3.1. *Model-3.1 ve Model-3.1(A) TR.16 $p=4,5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar*

				Model-3.1		Model-3.1(A)		
p	v	α	Sabit ADÜ Yeri	Çözüm Süresi (sn)	Dal-sınır Ağacı Sayısı	Çözüm Süresi (sn)	Dal-sınır ağacı sayısı	Amaç Fnk.
4	1	1	1, 2, 11, 14	49,968	7.254	24,219	4.431	2.530
		0.8		62,781	4.874	20,859	5.580	2.444,40
		0.6		56,625	6.498	20,86	5.363	2.358,80
		0.4		50,579	6.959	39,547	5.368	2.273,20
		0.2		56,719	6.538	21,672	5.593	2.187,60
4	2	1	1, 2, 11, 14	106,329	2.578	44,25	3.125	1.771
		0.8		92,328	6.382	55,094	4.475	1.707
		0.6		126,109	6.468	70,281	6.634	1.611
		0.4		67,813	3.755	56,547	5.289	1.511
		0.2		85,265	4.234	56,578	5.959	1.411
5	1	1	1, 2, 8, 11, 14	50,594	4.551	19,813	4.451	2.200
		0.8		42,422	3.442	48,828	7.417	2.108,80
		0.6		49,187	3.741	17,719	3.992	2.037,60
		0.4		62,610	5.342	21,719	2.762	1.939
		0.2		48,922	3.138	27,438	3.566	1.839
5	2	1	1, 2, 8, 11, 14	1.346,428	1.517	10,204	5	1.521
		0.8		1.791,703	1.086	9,469	24	1.421
		0.6		1.561,485	1.872	11,469	262	1.323,60
		0.4		4.803,860	160.046	11,156	413	1.252,40
		0.2		2.299,578	1.627	10,719	358	1.181,20
			Toplam Süre	12.811,305		598,441		
			Ortalama Süre	640,5653		29,9221		

Tablo 3.1’den inceleneceği üzere, *Model-3.1*’in toplam çözüm süresi 12.811,305 saniye iken simetri bozma kısıtının ekli olduğu *Model-3.1(A)*’nın toplam çözüm süresi 598,441 saniyedir. Bununla birlikte, simetri bozma kısıtının olmadığı durumda, problem

örneklerinin ortalama çözüm süresi 640,5653 saniye iken, olduğu durumda 29,9221 saniye olarak çözüm süresi her iki durumda da neredeyse 20 kat daha düşük gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, problem örneklerinin çözülmesi için gereken dal-sınır sayılarında da çok büyük bir azalma görülmektedir. Problem örneklerinde, simetri bozma kısıtının en çok etkilediği örnekler TR16.5.2 üzerinde tüm ' α ' değerleri üzerinde olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, ADÜ sayısı ve araç sayısı arttıkça, problem örnekleri üzerinde simetrinin de artması olarak açıklanabilir. Dolayısıyla, ADÜ sayısı ve her ADÜ'ye atanan araç sayısındaki artışla birlikte, simetri bozma kısıtı modeller üzerinde çok büyük etkiler gösterebilmektedir. Bu anlatılan özelliğe en çarpıcı örnek, 16.5.2 problemi üzerinde indirim katsayısının 0,4 olduğu durumda rastlanmıştır. Simetri bozma kısıtı olmayan problemin çözüm süresi 4.803,86 saniye iken, simetri bozma kısıtının eklendiği modelde ise çözüm süresi 11,156 saniyeye düşmüştür. Aynı şekilde, aynı örnek için simetri bozma kısıtının olmadığı modelde dal-sınır sayısı 160.046 saniye iken, kısıtın eklendiği örnekte dal-sınır sayısı 413'e düşmüştür. Anlatılanların aksine, simetri bozma kısıtının deney yapılan test problemlerinin birinde iyileşme gösterememiştir. Bu örnek 5 ADÜ ve her ADÜ'ye 1 aracın atandığı ve ' α ' indirim katsayısının 0,8 olduğu örnektir ve Tablo 3.1.'de maliyet sütununda kalın olarak belirtilmiştir. Ancak örneğin çözümü için simetri bozma kısıtının (A) dahil olduğu ve olmadığı durumlardaki harcanan süre karşılaştırıldığında aralarında çok büyük bir farklılık olmadığı görülmüştür.

Özetle *Model-3.1(A)*'nın toplam çözüm süresi, ortalama çözüm süresi ve türetilen dal-sınır ağacı sayısı *Model-3.1*'e kıyasla her örnekte iyileşme gösterdiğinden bundan sonraki tüm deneylerde simetri bozma kısıtı modele eklenmiştir.

İzleyen bölümde, karma tamsayılı matematiksel model örneği için geliştirilen geçerli eşitsizlikler anlatılacaktır.

3.1.2. Geçerli Eşitsizlikler

Geçerli eşitsizlikler, modelin çözüm uzayını daraltan dolayısıyla model çözümü için gereken çözüm süresini de kısaltan kısıtlardır. Ancak bu kısıtlar bazı durumlarda çözüm süresinin artmasına da sebep olabilmektedir.

Bölüm 3.1.2'de sunulan geçerli eşitsizliklerin model üzerindeki etkileri incelenmiştir.

SADÜMRP için geliştirilen karma tamsayılı matematiksel programlama modeli için bir geçerli eşitsizlik aşağıda sunulmuştur:

$$Z \geq \alpha * maksimum_{i,j}(d_{ij}) \quad (B)$$

(B) geçerli eşitsizliği ile amaç fonksiyonunun kullanılan veri seti içerisinde bulunan maksimum uzaklık değerinden daha büyük olduğu belirtilmiştir. i düğümünden j düğümüne giderken en az bir başka k noktasına uğranılması durumu şöyle hesaplanır: “ $d_{ik} + d_{kj}, i \neq j \neq k$ ”.

Üçgensel eşitsizlik prensibinden ise aşağıdaki durum sağlanır:

$$d_{ik} + d_{kj} \geq d_{ij}, \quad \forall i, j, k.$$

Dolayısıyla, herhangi bir veri setinde ‘ d_{ij} ’ değeri “ $maksimum(d_{ij})$ ” değerini de içereceğinden, amaç fonksiyonu değeri en az “ $maksimum(d_{ij})$ ” değeri kadar olacaktır. Burada belirtilmek istenen, eğer ADÜ’ler arasında indirim katsayısı kullanılıyorsa, ‘ α ’nın da katsayı olarak kullanılması gerektiridir.

Model-3.1(A) ve bu modele (B) kısıtı eklenerek oluşturulmuş *Model-3.1(A+B)*’nin test sonuçları Tablo 3.2’de yer almaktadır. Tablo 3.2’de yer alan ilk üç sütun sırasıyla ‘ p , v , α ’ bir önceki bölümde anlatıldığı gibi sırasıyla ölçek ekonomisi, açılacak ADÜ sayısı ve her ADÜ’ye atanan araç sayısını ifade etmektedir. Dördüncü sütunda belirli ADÜ yerleri, beşinci sütunda (A) kısıtının yer aldığı *Model-3.1*, altıncı sütunda (A) ve (B) kısıtının yer aldığı *Model-3.1* ve son sütunda ise toplam maliyet değerleri yer almaktadır.

Tablo 3.2. *Model-3.1(A) ve Model-3.1(A+B) TR.16 $p=4,5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar*

				Model-3.1(A)	Model-3.1(A+B)	
p	v	α	Sabit ADÜ Yeri	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Amaç Fnk.
4	1	1	1, 2, 11, 14	24,219	33,766	2.530
		0.8		20,859	28,016	2.444,40
		0.6		20,86	24,187	2.358,80
		0.4		39,547	22,172	2.273,20
		0.2		21,672	22,859	2.187,60
4	2	1	1, 2, 11, 14	44,25	46,359	1.771
		0.8		55,094	94,625	1.707
		0.6		70,281	93,86	1.611

		0.4		56,547	55,563	1.511
		0.2		56,578	45,063	1.411
5	1	1	1, 2, 8, 11, 14	19,813	36,75	2.200
		0.8		48,828	29,063	2.108,80
		0.6		17,719	31	2.037,60
		0.4		21,719	21,89	1.939
		0.2		27,438	26,203	1.839
5	2	1	1, 2, 8, 11, 14	10,204	12,875	1.521
		0.8		9,469	9,39	1.421
		0.6		11,469	9,469	1.323,60
		0.4		11,156	10,813	1.252,40
		0.2		10,719	11,015	1.181,20
			Toplam Süre	598,441	664,938	
			Ortalama Süre	29,9221	33,2469	

Tablo 3.2. incelendiğinde önerilen geçerli eşitsizliğin 16 problem örneğinin 8’inde iyileştirme sağladığı görülmüştür. İyileşme sağlanan örnekler incelendiğinde, indirim katsayısı değerinin 1.0’dan küçük olan örnekler için olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, veri setinde yer alan 16 düğüm için maksimum ‘ d_{ij} ’ uzaklığının amaç fonksiyonu değerine yakın bir değer olmasının $\alpha=1$ olduğu durumda çözüm üzerinde etkili olamadığı düşünülmektedir. Ancak, toplam ve ortalama süreler bakıldığında, *Model-3.1(A)*’nın toplam çözüm süresinin 598,441 saniye iken *Model-3.1(A+B)*’nin toplam çözüm süresinin 664,938 saniyeye çıktığı görülmüştür. Aynı şekilde problem örneklerinin çözümü için harcanan ortalama sürelerde de artış vardır. Bu sebeple bundan sonra yapılan deneylerde (B) geçerli eşitsizliğinin kullanılmamasına karar verilmiştir.

Bir sonraki bölümde yukarıda kısıtları anlatılan ve testleri yapılan *Model-3.1* üzerinde gerçekleştirilen sayısal sonuçlar anlatılacaktır.

3.2. Sayısal Sonuçlar

Geliştirilen matematiksel model, Türkiye PTT veri setine ait 16 düğümlük veri seti üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1’de bahsedildiği üzere açılacak ADÜ yerleri, her ‘ i ’ düğümünün diğer düğümlere olan toplam uzaklıkları hesaplanmış, toplam uzaklıklar küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve toplam uzaklık değeri en küçük olan ‘ p ’ sayıda ADÜ yeri problemlere girdi olarak verilmiştir.

Tablo 3.3'teki ilk sütun ' $p.v.$ ' ile ' p ' kurulacak ADÜ sayısı, ' v ' ile de her ADÜ'ye atanan araç sayısı değeri, ikinci sütun ' α ' indirim katsayısı değerini belirtmektedir. Üçüncü sütunda belirli ADÜ yerleri, dördüncü sütunda çözüm süresi (sn) cinsinden değerler, beşinci sütunda amaç fonksiyonu değerleri, altıncı sütunda modellerin çözülmesi için gereken dal-sınır ağacı sayısı ve son sütunda ise araçların oluşturduğu rotalar yer almaktadır.

Tablo 3.3. Model-3.1 TR.16 $p=3$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar

p. v.	α	ADÜ yerleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
3.1.	1	1, 2, 11	3.190	18,719	8.625	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
	0,8		3.118,80	19,484	7.130	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
	0,6		3.047,60	25,407	11.093	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2; 11-3-10-12-4-9-11
	0,4		2.976,40	27,64	6.843	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2; 11-3-10-12-4-9-11
	0,2		2.909,60	14,125	2.808	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
3.2.	1	1, 2, 11	2.283	315,969	50.933	1-7-8-1; 1-16-5-1; 2-4-9-2; 2-13-14-2; 11-10-12-3-11; 11-15-6-11
	0,8		2.193	913,828	55.942	1-5-16-7-1; 1-14-8-1; 2-6-2; 2-15-13-2; 11-9-4-11; 11-10-12-3-11
	0,6		2.095	581,297	39.238	1-5-16-7-1; 1-14-8-1; 2-6-2; 2-15-13-2; 11-9-4-11; 11-10-12-3-11
	0,4		2.001,20	226,328	34.235	1-7-16-5-1; 1-8-14-1; 2-6-2; 2-13-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
	0,2		1.978	234,437	35.851	1-6-1; 1-8-7-5-16-1; 2-13-14-2; 2-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
3.3.	1	1, 2, 11	1.888	765,156	32.929	1-5-1; 1-14-1; 1-16-7-1; 2-4-9-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-6-11; 11-8-3-11; 11-15-11
	0,8		1.856	255,766	14.834	1-5-1; 1-14-1; 1-16-7-1; 2-9-4-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-6-11; 11-15-11
	0,6		1.840	335,937	34.937	1-5-16-7-1; 1-6-1; 1-15-1; 2-9-4-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-8-11; 11-14-11
	0,4		1.742	252,594	25.735	1-6-1; 1-7-5-16-1; 1-15-1; 2-8-2; 2-9-4-2; 2-12-10-2; 11-3-11; 11-13-11; 11-14-11
	0,2		1.672	296,953	34.513	1-5-1; 1-6-1; 1-7-16-8-1; 2-9-4-2; 2-14-2; 2-15-2; 11-3-11; 11-10-12-11; 11-13-11

Bölüm 3.2’de yer alan SADÜMRP çözümleri için ‘TR.n.p.v’ kısaltması kullanılacaktır. Kısaltmada; ‘TR’ Türkiye veri seti, ‘n’ veri setinde yer alan düğüm sayısı, ‘p’ açılacak ADÜ sayısı ve ‘v’ her bir ADÜ’ye atanan araç sayısı değerini belirtmektedir.

Tablo 3.3 üzerinde araç sayılarının çözümleri nasıl etkilediği incelenecek olursa ‘ α ’ indirim katsayısı değerleri ‘1’ olarak alındığında; her ADÜ’ye 1 aracın atandığı TR16.3.1 probleminin amaç fonksiyonu 3.190 km iken, araç sayısının 2 olduğu TR.16.3.2 probleminin amaç fonksiyonu 2.283 km’ye ve araç sayısının 3 olduğu durumda TR.16.3.3 probleminin amaç fonksiyonu 1.888 km’ye düştüğü gözlenmiştir. Diğer tüm indirim katsayısı değerleri içinde aynı trendin söz konusu olduğu tablodan incelenebilir. Bunun nedeninin, araç sayıları arttıkça rotalarda daha az şehir ziyaretinden dolayı rotaların kısalması, dolayısıyla da ‘i-j’ düğümleri arasındaki mesafenin kısalması olarak açıklanabilir.

Tablo 3.4’teki ilk sütun ‘p.v.’ ile ‘p’ kurulacak ADÜ sayısı, ‘v’ ile de her ADÜ’ye atanan araç sayısı değeri, ikinci sütun amaç fonksiyonu değerini belirtmektedir. Üçüncü sütunda toplam ulaşım maliyeti (günlük) değerlerini, dördüncü sütunda ulaşım maliyetlerindeki azalış (günlük) değerlerini, beşinci sütunda ise araç satınalma bedeli yer almaktadır.

Araç sayısının maliyetlere etkisi incelenmek istendiğinde her bir aracın 100 km’de tükettiği yakıt miktarı araştırılmış ve ortalama 27 lt olduğu belirlenmiştir. Günümüzdeki akaryakıt fiyatları incelendiğinde ürün taşıyan araçların tükettiği motorinin lt fiyatının ortalama 6 TL olduğu gözlenmiştir. Anlatılanlardan hareketle bir aracın bir km’de ulaşım maliyeti 1,62 TL olarak hesaplanmıştır. Araç filosuna katılması planlanan araçların ortalama satınalma maliyetleri 500.000 TL, 400.000 TL ve 300.000 TL’dir.

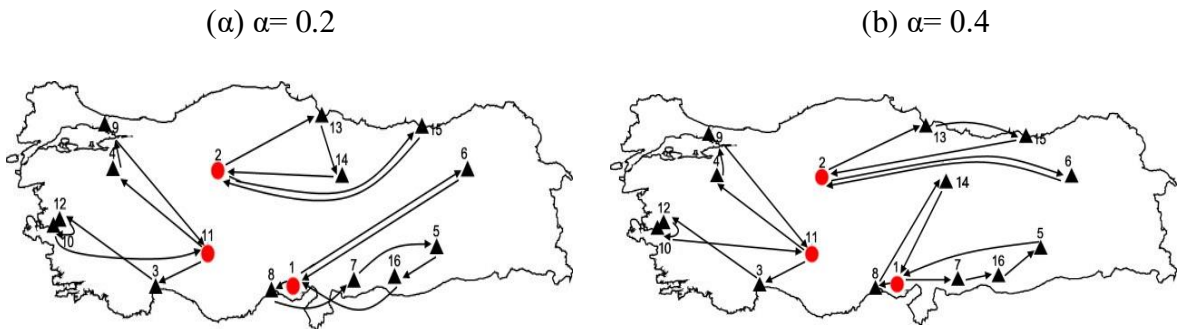
Tablo 3.4. Araç Sayısının Maliyetler Üzerindeki Etkileri

p.v.	Amaç Fonk.	Toplam Ulaşım Maliyeti (Günlük)	Ulaşım Maliyetindeki Azalış (Günlük)	Araç Satınalma Bedeli
3.1.	3.190 km	669.900 TL	-	500.000 TL
3.2.	2.283 km	479.430 TL	1.469,34 TL	500.000 TL
3.3.	1.888 km	396.480 TL	639,9 TL	500.000 TL
3.1.	3.190 km	669.900 TL	-	400.000 TL

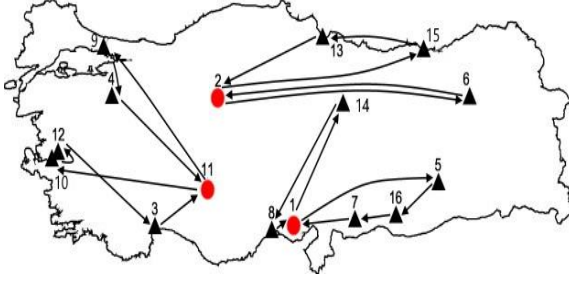
3.2.	2.283 km	479.430 TL	1.469,34 TL	400.000 TL
3.3.	1.888 km	396.480 TL	639,9 TL	400.000 TL
3.1.	3.190 km	669.900 TL	-	300.000 TL
3.2.	2.283 km	479.430 TL	1.469,34 TL	300.000 TL
3.3.	1.888 km	396.480 TL	639,9 TL	300.000 TL

Tablo 3.4'te görüldüğü üzere araç filosuna 500.000 TL olan araç eklenerek, araç sayısı 1'den 2'ye yükseltildiğinde ulaşım maliyetinde %28 oranında 1.469,34 TL'lik azalma olduğu görülmektedir. Araç filosuna bir araç daha eklenerek araç sayısı 3'e yükseltildiğinde ulaşım maliyetlerinde %17 oranında 639,9 TL'lik azalma olduğu görülmektedir. Her bir ADÜ'ye atanan 500.000 TL değerindeki araç sayısı 1'den 2'ye yükseltildiğinde filodaki araç sayısı 6'ya yükselmekte ve toplam araç satın alma bedeli 1.500.000 TL olarak hesaplanmaktadır. Satın alınan aracın kendini amorti etme süresi 1.021 gün, araç sayısı 2'den 3'e yükseltildiğinde ise bu süre 2.345 gün olmaktadır. Karar vericiler için araçların kendi maliyetini amorti etme süreleri uzun bulunur ise satın alınacak araçların Tablo 3.4'te yer alan daha düşük maliyetli araçlardan seçilmesi önerilmektedir. Ek olarak araç sayılarının arttırılmasıyla ziyaret edilecek şehir sayıları azaldığından düşük kapasiteli araçlar da ihtiyacı karşılayabilecektir. Bu sebeple de araç filosuna katılması planlanan araçların, düşük kapasiteli araçlardan seçilmesi önerilebilir.

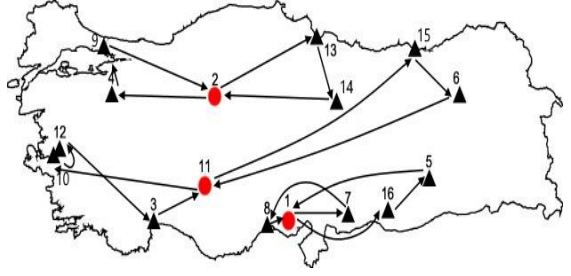
Geliştirilen karma tamsayılı matematiksel programlama formülasyonunda ' α ' indirim katsayısı değerlerinin çözümleri nasıl etkilediğini incelemek için TR.16.3.2 probleminin $\alpha = 1; 0,8; 0,6; 0,4$ ve $0,2$ değerlerine göre rotalarına ait çözümler Şekil-3.1'de Türkiye haritası üzerinde çizilerek gösterilmiştir.



(c) $\alpha = 0.6-0.8$



(d) $\alpha = 1$



Şekil 3.1. TR.16.3.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

Daha önce belirtildiği gibi, ADÜ yerleri belirlenirken kullanılan yöntem en merkezi konumda olan düğümlerin ADÜ düğümleri olmasını sağlamıştır. Bu seçime göre ADÜ'ler 1-Adana, 2-Ankara ve 11-Konya düğümlerinden oluşmaktadır.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=0,2$ olduğunda kurulan ADÜ'ler genellikle yerleşim olarak yakın yerlere konumlandırılmış düğümlere hizmet sağlamaktadır. Bu indirim katsayısı değeri için, her bir ADÜ düğümünün aracına ait toplama değerleri 1-Adana ADÜ'sü için; collect_sum(1,1): 1.115 km, collect_sum(1,2): 809 km; 2-Ankara ADÜ'sü için; collect_sum(2,3): 765 km, collect_sum(2,4): 781 km; 11-Konya ADÜ'sü için; collect_sum(11,5): 1.015 km, collect_sum(11,6): 911 km şeklinde oluşmuştur. Benzer şekilde, dağıtım değerleri ise sırasıyla; 1-Adana ADÜ'sü için; distribute_sum(1,1): 841 km, distribute_sum(1,2): 809 km; 2-Ankara ADÜ'sü için; distribute_sum(2,3): 765 km, distribute_sum(2,4): 758 km; 11-Konya ADÜ'sü için; distribute_sum(11,5): 787 km, distribute_sum(11,6): 730 km şeklinde gerçekleşmiştir.

Bir ADÜ'nün bir aracı için toplama değerinin (collect_sum) nasıl hesaplanacağına dair kısa bir örnek izleyen paragrafta sunulmuştur.

Örneğin, 3 numaralı ADÜ olan 11-Konya'nın ilk araç rotası: Collect_sum(11,5); "11-3-12-10-11" şehir sırasından oluşmuştur. Bu araç için toplama mesafesi şu şekilde hesaplanır: Oluşan rotanın ADÜ haricindeki ilk şehirden başlanarak ADÜ'ye kadar mesafeler toplanır: Toplama mesafesi; $d(3,12)=428$ km, $d(12,10)=36$ km, $d(10,11)=551$ km; $d(3,12)+d(12,10)+d(10,11)=1.015$ km şeklinde yapılmaktadır.

Bir ADÜ'nün bir aracı için dağıtım değerinin (distribute_sum) nasıl hesaplanacağına dair kısa bir örnek izleyen paragrafta sunulmuştur.

Dağıtım değerleri ise, ADÜ'lerden başlanarak rotanın içindeki son ziyaret edilecek şehrin mesafesi toplanarak hesaplanır. Örneğin, 1 numaralı ADÜ olan Adana'nın ilk rotasına ait dağıtım değeri izleyen şekilde hesaplanmaktadır: Distribute_sum(1,1); "1-8-7-5-16-1" şehir sırasından oluşmuştur. Distribute_sum(1,1) değeri $d(1,8)=69$ km, $d(8,7)=275$ km, $d(7,5)=317$ km, $d(5,16)=180$ km, $d(1,8)+d(8,7)+d(7,5)+d(5,16)=841$ km şeklinde hesaplanmaktadır.

TR.16.3.2 $\alpha=0,2$ örneği için en büyük uzaklığa sahip rotaları 1-Adana ADÜ'sünün collect_sum(1,1) değeri: 1.115 km; 2-Ankara ADÜ'sünün distribute_sum(2,1) değeri: 765 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 490 km'nin 0,2 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu elde edilen değer 1.978 km'dir.

İndirim katsayısı $\alpha=0,4$ için amaç fonksiyonu değeri 2.001,2 km'dir ve bu değer 2-Ankara ADÜ'sünün collect_sum(2,4) değeri 1.111 km, 11-Konya ADÜ'sünün distribute_sum(11,5) değeri 787 km ve (2-11) ADÜ'leri arasındaki uzaklık 258 km'nin 0,4 indirim katsayısı ile çarpılması sonucu oluşan değerın toplanmasıyla bulunmuştur.

Yukarıda bahsedilen iki farklı indirim katsayısı için rotalar arasındaki farklılıklar incelenecek olursa, 11-Konya ADÜ'süne ait rotalarda herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Bu yüzden, bu ADÜ'ye ait toplama (collect_sum) ve dağıtım (distribute_sum) değerleri aynı kalmıştır. Ancak 1-Adana ADÜ'sü ve 2-Ankara ADÜ'süne ait rotalarda değişimler olmuştur. Örneğin $\alpha=0,2$ olduğunda, 6-Erzurum düğümü; 1-Adana ADÜ'süne atanmışken $\alpha=0,4$ olduğunda 2-Ankara ADÜ'süne atanmış ve tek başına rotalardan birini oluşturmuştur. Aynı şekilde 14-Sivas düğümü $\alpha=0,2$ iken 2-Ankara ADÜ'süne atanmışken, $\alpha=0,4$ iken 1-Adana ADÜ'sündeki rotalara atanmıştır. Dolayısıyla bu değişimler, rotaların maksimum toplama ve maksimum dağıtım değerlerini büyük ölçüde etkilemiştir.

Şekil 3.1(c)'de görüldüğü üzere indirim katsayısı değeri 0,6 ve 0,8 olduğunda ADÜ'lerin oluşturduğu rotalar aynı rotalardan oluşmuştur. $\alpha=0,6$ ve $\alpha=0,8$ olduğunda $\alpha=0,4$ iken elde edilen tasarım ağının aynısı elde edilmesine rağmen GAMS ticari çözücüsü tarafından araçların şehirleri ziyaret sıraları ters olarak yerleşmiştir. Burada

belirtmek isteriz ki, rotaların yerleşiminin tersten oluşması, amaç fonksiyonu değerini aynı indirim katsayısı değerleri üzerinde etkilemeyecektir.

$\alpha=0,6$ için amaç fonksiyonu 2.095 km değeri ise en büyük uzunluğa sahip olan rotalar 2-Ankara ADÜ'sünün collect_sum(2,4) değeri 876 km, 1-Adana ADÜ'sünün distribute_sum(1,1) değeri 925 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 490 km'nin 0,6 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla elde edilmiştir.

$\alpha=0,8$ olduğunda ise tek farklılık ADÜ'ler arasındaki mesafe 490 km'nin indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla amaç fonksiyonu değeri 2.193 km bulunarak farklılaşmıştır.

Şekil 3.1(d) incelendiğinde indirim katsayısı değeri 1 olduğunda ise, rotaların şehirleri ziyaret sırası ve rotaları, dolayısıyla ADÜ'lere atamalar $\alpha=0,8$ olduğu durumdan oldukça farklılaşmıştır. 1-Adana ADÜ'sü ve 2-Ankara ADÜ'sü kendine görece olarak yakın şehirlere servis sağlarken, 11-Konya ADÜ'sünün bir aracının Karadeniz ve Doğu Anadolu Bölge'sinde yer alan Trabzon ve Erzurum şehirlerine hizmet verdiği, diğer aracının da Akdeniz ve Ege Bölgesi'nde yer alan Antalya, İzmir ve Manisa şehirlerine hizmet verdiği görülmektedir.

İndirim katsayısı $\alpha=1$ için amaç fonksiyonu 2.283 km değeri ise en büyük uzunluğa sahip olan rotalar 1-Adana ADÜ'sünün collect_sum(1,2) değeri 703 km ve 11-Konya ADÜ'sünün distribute_sum(11,6) değeri 1.224 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 356 km'nin toplanmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 3.5'te yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 3.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir.

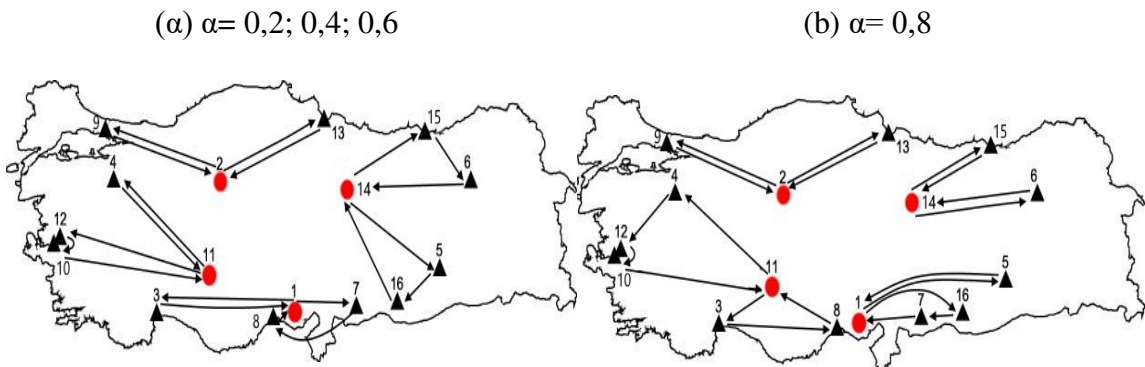
Tablo 3.5. Model-3.1 TR.16 $p=4$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar

p. v.	α	ADÜ yerleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
4. 1.	1	1, 2, 11, 14	2.530	24,219	4.431	1-16-5-7-8-1; 2-4-9-2; 11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,8		2.444,40	20,859	5.580	1-8-7-16-5-1; 2-9-4-2; 1 1-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
	0,6		2.358,80	20,86	5.363	1-8-16-5-7-1; 2-4-9-2; 11-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
	0,4		2.273,20	39,547	5.368	1-8-5-16-7-1; 2-4-9-2;

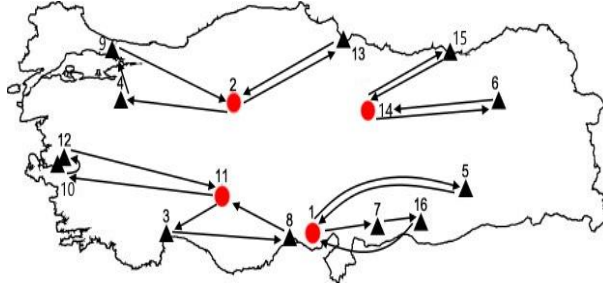
						11-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
	0,2		2.187,60	21,672	5.593	1-8-7-16-5-1; 2-4-9-2; 11-3-10-12-11; 14-13-15-6-14
4. 2.	1	1, 2, 11, 14	1.771	44,25	5.964	1-5-1; 1-7-16-1; 2-4-9-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1.707	55,094	7.261	1-5-1; 1-16-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-4-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1.611	70,281	7.537	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2; 11-4-11; 11-10-12-11; 14-5-16-14; 14-6-15-14
	0,4		1.511	56,547	5.069	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2; 11-4-11; 11-12-10-11; 14-15-6-14; 14-16-5-14
	0,2		1.411	56,578	5.460	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2; 11-4-11; 11-12-10-11; 14-5-16-14; 14-15-6-14
4. 3.	1	1, 2, 11, 14	1.485	21,141	1.169	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,8		1.385	21,672	1.193	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,6		1.287,60	23,953	2.785	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,4		1.216,40	23,235	2.006	1-5-1; 1-7-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-8-2; 2-9-2; 11-3-11; 11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-13-14; 14-15-14
	0,2		1.131	19,234	646	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14

TR.16 düğümlü ve 3 ADÜ'ye ait çözümlerde araç sayısının çözüme etkisi 4 ADÜ'lü çözümlerde de incelenmiştir. Benzer şekilde karşılaştırma yapıldığında tüm indirim katsayısı değerleri için araç sayısı arttıkça, rotaların toplam uzunlukları kısaldığı için, amaç fonksiyonu değerlerinde düşüş olduğu gözlenmiştir.

Tabloda yer alan TR.16.4.2 probleminin $\alpha = 1; 0,8; 0,6; 0,4$ ve $0,2$ değerlerine göre rotalarına ve tasarım ağlarına ait çözümler Şekil-3.2'de yer almaktadır.



(c) $\alpha=1$



Şekil 3.2. TR.16.4.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

TR.16.4.2 probleminde Şekil 3.1’de yer alan 1-Adana, 2-Ankara, 11-Konya ADÜ’lerine ek olarak, daha önce bahsedildiği gibi her bir düğümün diğer düğümlere olan uzaklıklarının toplanması ve ‘ p ’ sayıda ADÜ için en düşük toplama ait ‘ p ’ sayıda ADÜ’nün seçilmesiyle 14-Sivas şehri ADÜ olarak çözümlere eklenmiştir.

$\alpha=0,2$ için en büyük uzunluğa sahip olan rotalar 14-Sivas ADÜ’sünün $\text{distribute_sum}(14,8)$ değeri: 724 km; 11-Konya ADÜ’sünün $\text{collect_sum}(11,6)$ değeri: 587 km ve ADÜ’ler arasındaki mesafe 500 km’nin 0,2 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla 1.411 km olarak bulunmuştur.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=0,2$ olduğunda her ADÜ kendine görece yakın şehirlere servis sağlamıştır.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=0,4$ olduğunda $\alpha=0,2$ iken oluşan araç rotaları arasındaki farklılıklar; elde edilen tasarım ağlarının aynı olmasına rağmen 14-Sivas ADÜ’süne ait bir aracın şehirleri ziyaret sıraları ters olarak yerleşmiştir. Rotaların yerleşiminin tersten oluşması, amaç fonksiyonu değerini aynı indirim katsayısı değerleri üzerinde etkilememektedir.

Amaç fonksiyonu değeri $\alpha=0,4$ olduğunda $\alpha=0,2$ olduğundaki (collect_sum) ve (distribute_sum) değerleri aynı kaldığından, tek farklılık ADÜ’ler arasındaki mesafe 500 km’nin indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla elde edilmiştir.

Şekil 3.2(a)'da görüldüğü üzere indirim katsayısı değeri $\alpha=0,6$ olduğunda $\alpha=0,4$ ve $\alpha=0,2$ olduğundaki durumda elde edilen tasarım ağının aynı olduğu ancak $\alpha=0,4$ 'ten farklı olarak 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ'lerine ait araçların şehirleri ziyaret sıralarının ters olarak yerleştiği görülmektedir.

Dolayısıyla $\alpha=0,6$ olduğunda da (collect_sum) ve (distribute_sum) değerleri $\alpha=0,2$ ve $\alpha=0,4$ ile aynı olduğundan, ADÜ'ler arasındaki mesafe 500 km'nin indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla 1611 km elde edilmiştir.

Şekil 3.2(b)'de görüldüğü üzere indirim katsayısı değeri $\alpha=0,8$ olduğunda $\alpha=0,6$ olduğundaki şekiller için rotalar arasındaki farklılıklar incelenecek olursa tasarım ağının değiştiği gözlenmektedir. Ancak 2-Ankara ADÜ'süne ait rotalarda herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. $\alpha=0,6$ olduğu durumda 14-Sivas ADÜ'sü Güney Doğu Anadolu Bölge'sinde yer alan Diyarbakır ve Urfa düğümlerine hizmet verirken, $\alpha=0,8$ olduğunda uzaklıklarının daha yakın olduğu 1-Adana ADÜ'süne atanmışlardır. Aynı şekilde 3-Antalya ve 8-Mersin düğümleri $\alpha=0,6$ iken 1-Adana ADÜ'süne atanmışken, $\alpha=0,8$ olduğunda 11-Konya ADÜ'sündeki rotalara atanmıştır. Rotalarda meydana gelen bu değişimler, rotaların maksimum toplama ve maksimum dağıtım değerlerinin değişmesine sebep olmuştur.

$\alpha=0,8$ için amaç fonksiyonu 1.707 km değeri, en büyük uzunluğa sahip olan rotalar 14-Sivas ADÜ'sünün distribute_sum(14,8) değeri 434 km, 11-Konya ADÜ'sünün collect_sum(11,6) değeri 873 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 500 km'nin 0,8 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu değerlerin toplanmasıyla elde edilmiştir.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=1$ olduğunda $\alpha=0,8$ olduğundaki şekiller için rotalar arasındaki farklılıklar incelenecek olursa, 14-Sivas ADÜ'süne ait rotalarda herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Ancak 4-Bursa düğümü $\alpha=0,8$ iken 11-Konya ADÜ'süne atanmışken $\alpha=1$ olduğunda 2-Ankara ADÜ'süne atanmış ve yeni rota oluşturmuştur. Ek olarak $\alpha=0,8$ iken 1-Adana ADÜ'sünde yer alan bir aracın oluşturduğu rotada şehirleri ziyaret ettiği sırayla $\alpha=1$ olduğunda oluşturduğu rotada şehirleri ziyaret sıraları ters olarak yerleşmiştir.

Dolayısıyla $\alpha=1$ için amaç fonksiyonu değeri, en büyük uzunluğa sahip olan rotalar 14-Sivas ADÜ'sünün distribute_sum(14,7) değeri 434 km, 11-Konya ADÜ'sünün

collect_sum(11,5) değeri 837 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 500 km'nin toplanmasıyla 1.771 km olarak bulunmuştur.

Yukarıda anlatılanlardan hareketle, ADÜ yerlerinin sabit olmasına rağmen, ' α ' indirim katsayısının değişmesiyle birlikte rotalar üzerinde de değişimler olduğu görülmektedir. Genel olarak ' α ' indirim katsayısı düştüğünde, rotalardaki araçlar ADÜ'lerden görece uzak düğümlere hizmet verebilirken, indirim katsayısı arttığında ise, araçlar genellikle ADÜ düğümlerine yakın düğümlere hizmet vermektedir. Bunun nedeninin ise, ADÜ'ler arasındaki indirim katsayısı değerinin düşmesiyle, oluşan rotalarda uzak şehirlere gidebilme olasılığının artması ve bu durumun amaç fonksiyonunu daha az etkilemesi olarak açıklanabilmektedir.

Tablo 3.6'da yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 3.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir.

Tablo 3.6. Model-3.1 TR.16 $p=5$ $v=1,2$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar

p. v.	α	ADÜ yerleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5. 1.	1	1, 2, 8, 11, 14	2.200	19,813	3.566	1-6-1; 2-4-9-2; 8-7-5-16-8;
						11-3-12-10-11; 14-13-15-14
	0,8		2.108,80	48,828	7.417	1-6-1; 2-4-9-2; 8-7-16-5-8;
						11-3-12-10-11; 14-13-15-14
	0,6		2.037,60	17,719	3.992	1-6-1; 2-4-9-2; 8-7-5-16-8;
						11-3-10-12-11; 14-13-15-14
	0,4		1.939	21,719	2.732	1-5-16-7-1; 2-9-4-2; 8-13-8;
						11-12-10-3-11; 14-6-15-14
	0,2		1.839	27,438	3.566	1-16-5-7-1; 2-9-4-2; 8-13-8;
						11-12-10-3-11; 14-6-15-14
5. 2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1.521	10,204	5	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
						11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14;
	0,8		1.421	9,469	24	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
						11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14;
	0,6		1.323,60	11,469	262	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
						11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14;
	0,4		1.252,40	11,156	413	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
						11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14;
	0,2		1.181,20	10,719	358	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
						11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14;

Tablo 3.6’da yer alan 1-Adana, 2-Ankara, 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ’lerine ek olarak, daha önce bahsedildiği gibi her bir düğümün diğer düğümlere olan uzaklıklarının toplanması ve ‘ p ’ sayıda ADÜ için en düşük toplama ait ‘ p ’ sayıda ADÜ’nün seçilmesiyle 8-Mersin şehri de ADÜ olarak çözümlere eklenmiştir.

Açılacak ADÜ sayılarının amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi ‘ α ’ indirim katsayısı değerleri ‘1’ olarak alındığında; TR.16.3.2 probleminin amaç fonksiyonu değeri 2.283 km iken, TR.16.4.2 probleminin amaç fonksiyonu değeri 1.771 km, TR.16.5.2 probleminin amaç fonksiyonu değeri de 1.521 km olmuştur. ‘ v ’ ve ‘ α ’ değerleri sabit bırakılıp ‘ p ’ açılacak ADÜ sayısını arttırdığımızda her ‘ $i-j$ ’ çifti arasındaki maksimum uzaklık düşmektedir. TR.16.3.1, TR.16.4.1 ve TR.16.5.1 problemlerinin amaç fonksiyonları incelendiğinde de aynı durum karşımıza çıkmaktadır. Anlatılanlardan hareketle açılacak ADÜ sayısı arttıkça, rotalarda hizmet verilecek şehirlerde yakın olanlara gidilebileceğinden amaç fonksiyonu değerleri düşmektedir.

Amaç fonksiyonu değeri ile açılacak ADÜ sayısı ve araç sayıları arasındaki ters orantının, bozulabilir ürün taşımacılığı yapan firmalar ya da 1 günde teslimat yapmayı hedefleyen kargo şirketleri için, ‘ $i-j$ ’ düğümleri arasındaki mesafenin kısılması sebebiyle önemli ölçüde fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

Bölüm 2’de bahsedilen Ernst vd. (2009) tarafından literature sunulan p-ADÜ merkez modeli (*Model-2.7*) kullanılarak TR.16 veri seti için ADÜ yerleri belirlenmiştir. Belirlenen ADÜ yerleri probleme girdi olarak verilmiş ve Model 3-1 üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu model Tablo 3.7’de, p-ADÜ merkez problemi olarak sağ kısımda, bundan önce kullanılan yöntem ise ‘önerilen yöntem’ olarak sol kısımda anlatılmış ve bunlara ilişkin veriler alt sütunlarda sunulmuştur.

Tablo 3.7’deki ilk sütun ‘ $p.v$ ’ ile ‘ p ’ kurulacak ADÜ sayısı ‘ v ’ ile de her ADÜ’ye atanan araç sayısı, ikinci sütun ‘ α ’ indirim katsayısı değeri belirtilmiştir. Önerilen yöntem için üçüncü sütunda belirli ADÜ yerleri, dördüncü sütunda amaç fonksiyonu değerleri, beşinci sütunda çözüm süresi (sn) cinsinden değerleri, altıncı sütunda modellerin çözülmesi için gereken dal-sınır ağacı sayısı yer almaktadır. p-ADÜ merkez problemi için yedinci sütunda belirli ADÜ yerleri, sekizinci sütunda amaç fonksiyonu değerleri, dokuzuncu sütunda çözüm süresi (sn) cinsinden değerleri ve onuncu sütunda modellerin çözülmesi için gereken dal-sınır ağacı sayılarına yer verilmiştir.

Tablo 3.7. Model-3.1 ADÜ Yerleri p-ADÜ Merkez Problemi ve Önerilen Yöntemle Belirlenen TR.16 $p=3,4,5$ $v=1,2,3$ $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Karşılaştırmalı Sayısal Sonuçları

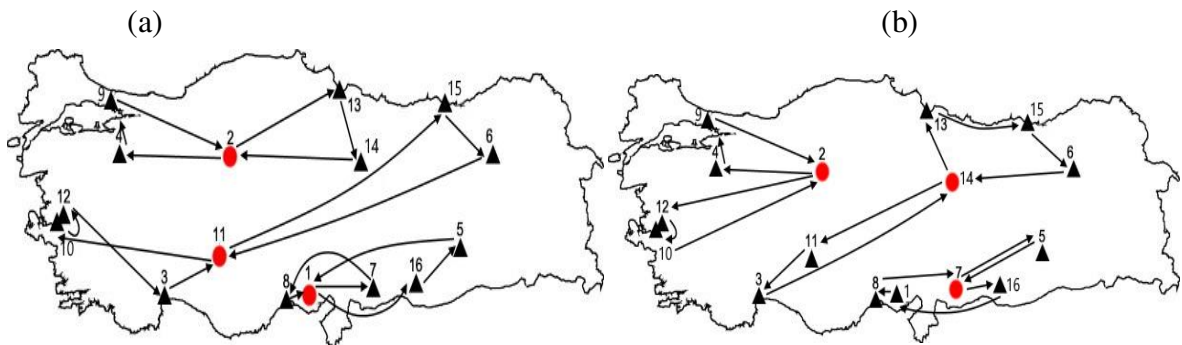
p. v.	α	Önerilen Yöntem				p-ADÜ Merkez Problemi			
		ADÜ yerleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi	Dal Sınır Ağacı Sayısı	ADÜ yerleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi	Dal Sınır Ağacı Sayısı
3.1.	1	1, 2, 11	3.190	18,719	8.625	2, 7, 14	3.327	10,203	2.266
3.2.		1, 2, 11	2.283	315,969	50.933	2, 7, 14	2.205	268,625	25.249
3.3		1, 2, 11	1.888	765,156	32.929	2, 7, 14	1.835	174,703	18.440
4.1.		1, 2, 11, 14	2.530	24,219	4.431	1,2,11,14	2.530	23,531	4.431
4.2.		1, 2, 11, 14	1.771	44,25	5.964	1, 2, 11, 14	1.771	41,953	5.964
4.3.		1, 2, 11, 14	1.485	21,141	1.169	1, 2, 11, 14	1.485	19,484	1.169
5.1.		1, 2, 8, 11, 14	2.200	19,813	3.566	2, 7, 10, 11, 14	2.356	18,125	2.719
5.2.		1, 2, 8, 11, 14	1.521	10,204	5	2, 7, 10, 11, 14	1.777	11,250	156
3.1.	0,8	1, 2, 11	3.118,8	19,484	7.130	2, 10, 14	3.492,6	39,453	14.462
3.2.		1, 2, 11	2.193	913,828	55.942	2, 10, 14	2.198,6	925,156	76.473
3.3		1, 2, 11	1.856	255,766	14.834	2, 10, 14	1.975,2	234,063	39.349
4.1.		1, 2, 11, 14	2.444,4	20,859	5.580	2, 11, 12, 14	2.638,4	96,516	11.782
4.2.		1, 2, 11, 14	1.707	55,094	7.261	2, 11, 12, 14	1.885,4	120,016	14.001
4.3.		1, 2, 11, 14	1.385	21,672	1.193	2, 11, 12, 14	1.710,4	20,547	573
5.1.		1, 2, 8, 11, 14	2.108,8	48,828	7.417	2, 11, 12, 14, 16	2.294	32,094	4.367
5.2.		1, 2, 8, 11, 14	1.421	9,469	24	2, 11, 12, 14, 16	1.522,4	12,687	221
3.1.	0,6	1, 2, 11	3.047,6	25,407	11.093	2, 14, 16	3.082	28,609	7.582
3.2.		1, 2, 11	2.095	581,297	39.238	2, 14, 16	2.028,2	78,282	8.640
3.3		1, 2, 11	1.840	335,937	34.937	2, 14, 16	1.658,2	163,953	13.308
4.1.		1, 2, 11, 14	2.358,8	20,86	5.363	2, 10, 11, 14	2.559,8	134,062	19.303
4.2.		1, 2, 11, 14	1.611	70,281	7.537	2, 10, 11, 14	1.731,6	79,062	8.744
4.3.		1, 2, 11, 14	1.287,6	23,953	2.785	2, 10, 11, 14	1.538,6	19,547	340
5.1.		1, 2, 8, 11, 14	2.037,6	17,719	3.992	2, 5, 6, 7, 15	2.508,8	64,671	8.569
5.2.		1, 2, 8, 11, 14	1.323,6	11,469	262	2, 5, 6, 7, 15	2.177	17,844	1.434
3.1.	0,4	1, 2, 11	2.976,4	27,640	6.843	4, 11, 14	3.111	36,016	9.690
3.2.		1, 2, 11	2.001,2	226,328	34.235	4, 11, 14	1.910,8	286,625	40.960
3.3		1, 2, 11	1.742	252,594	25.735	4, 11, 14	1.498	74,688	5.228
4.1.		1, 2, 11, 14	2.273,2	39,547	5.368	4, 10, 11, 14	2.622	82,047	17.520
4.2.		1, 2, 11, 14	1.511	56,547	5.069	4, 10, 11, 14	1.651,4	76,985	6.855
4.3.		1, 2, 11, 14	1.216,4	23,235	2.006	4, 10, 11, 14	1.722,8	29,047	2.237
5.1.		1, 2, 8, 11, 14	1.939	21,719	2.732	3, 4, 9, 12, 14	2.441,2	336,860	52.884
5.2.		1, 2, 8, 11, 14	1.252,4	11,156	413	3, 4, 9, 12, 14	1.963	24,875	2.226
3.1.	0,2	1, 2, 11	2.909,6	14,125	2.808	4, 11, 14	3.011	81,343	24.086
3.2.		1, 2, 11	1.978	234,437	35.851	4, 11, 14	1.786,4	313,359	26.093
3.3		1, 2, 11	1.672	296,953	34.513	4, 11, 14	1.401	69,734	3.464
4.1.		1, 2, 11, 14	2.187,6	21,672	5.593	5, 6, 11, 15	2.624,4	52,578	7.174
4.2.		1, 2, 11, 14	1.411	56,578	5.460	5, 6, 11, 15	1.964,4	166,656	26.124
4.3.		1, 2, 11, 14	1.131	19,234	646	5, 6, 11, 15	2.177	34,422	2.321
5.1.		1, 2, 8, 11, 14	1.839	27,438	3.566	3, 4, 9, 12, 14	2.283,6	110,954	20.721
5.2.		1, 2, 8, 11, 14	1.181,2	10,719	358	3, 4, 9, 12, 14	1.845,4	14,062	717

			Toplam Süre	4.991,316			Toplam Süre	7.877,834	
			Ortalama Süre	124,7829			Ortalama Süre	196,9459	

Daha önceki bölümde kullanılan ‘*TR.n.p.v*’ kısaltması Tablo 3.7 için de kullanılmaya devam edilecektir.

p-ADÜ merkez modeli kullanılarak belirlenen ADÜ yerleri ile yapılan test sonuçları incelendiğinde araç sayısının ve açılacak ADÜ sayısının artırılmasının amaç fonksiyonu değerleri üzerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir.

ADÜ yerlerinin, amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, önerilen yöntem ve p-ADÜ merkez yönteminden bulunan ADÜ’lerin oluşturduğu çözümlerin amaç fonksiyonları arasındaki farklılıklar Tablo 3.7’de incelenebilir. ‘ α ’ indirim katsayısı değeri sabit tutularak ADÜ yerlerinin önerilen yöntemle parametre olduğu durumlarda, amaç fonksiyonu hesaplarının büyük bir kısmında p-ADÜ merkez probleminin sonucuna göre daha düşük değer aldığı gözlemlenmektedir. Bu durumun tersi olan çözümlere daha az rastlandığı için bu çözümler Tablo 3.7’de kalın olarak işaretlenmiştir. Tablo 3.7’den görüleceği üzere, amaç fonksiyonu değeri artan çözümlerin tümünde ADÜ sayısı 3’tür. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 3.3’te Türkiye haritası üzerinde indirim faktörü değeri $\alpha=1$ olduğunda TR16.3.2’ye ait önerilen yöntem (a) ve p-ADÜ merkez problemi sonucu (b) alınan ADÜ’ler ve oluşan rotalar gösterilmiştir.

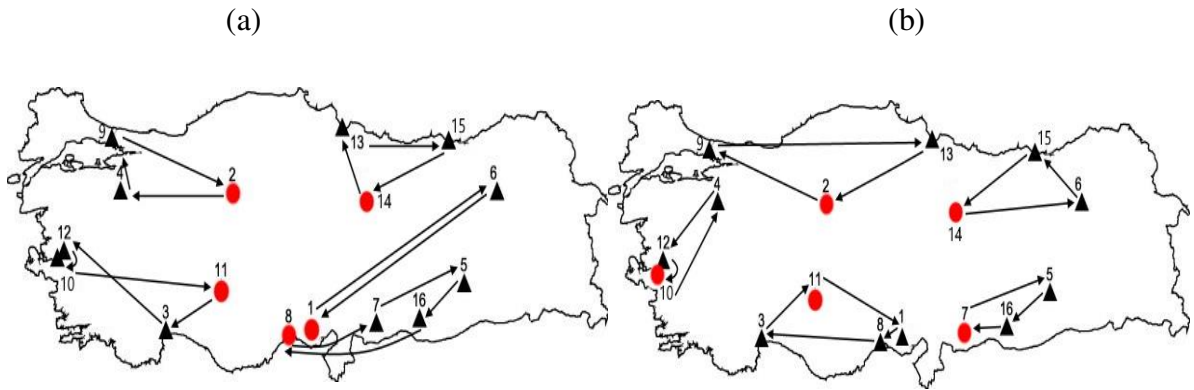


Şekil 3.3. TR.16.3.2 $\alpha=1$ ADÜ Yerleri Farklı Yöntemlerle Elde Edilmiş Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

Şekil 3.3(a)'dan inceleneceği üzere, ADÜ'ler önerilen yöntemde daha merkezi konumda bulunmakta, p-ADÜ merkez problemi sonuçlarında ise (Şekil 3.3(b)), daha bölgesel bir dağılım oluşmaktadır. Şekil 3.3(b)'de ise, ADÜ'ler arasında mesafe fazlalaşırken, rotaların maksimum toplama ve dağıtım uzunluklarının azalmasına sebep olmuştur. Amaç fonksiyonlarındaki düşüşün sebebi bu şekilde açıklanabilir.

ADÜ sayısının 3'ten fazla olduğu tüm örneklerde, ADÜ yerlerinin toplam mesafenin en kısa olacak şekilde yerleşmesine sebep olduğu ve rotalarının daha dengeli olduğu görülmektedir.

Bu duruma örnek olarak, önerilen yöntem ve p-ADÜ merkez sonuçlarından gelen ADÜ yerlerinin rotaları nasıl etkilediğini incelemek için TR16.5.1 problemi Şekil 3.4.'te verilmiştir. Buna göre, indirim katsayısı değeri 1 olduğunda; her bir ADÜ'nün diğer ADÜ'lere olan toplam uzaklığı hesaplandıktan sonra elde edilen ADÜ yerlerinin kullanıldığı TR.16.5.1 problemine ait çözüm şekli Şekil 3.4(a)'da; ADÜ yerlerinin p-ADÜ merkez modeli kullanılarak belirlendiği TR.16.5.1 problemine ait çözüm Şekil 3.4(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. TR.16.5.1 $\alpha=1$ ADÜ Yerleri Farklı Yöntemlerle Elde Edilmiş Model-3.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

Şekillerde de görüldüğü üzere ADÜ yerleri birbirlerine oldukça benzemektedir. Şekil 3.4(a)'daki ADÜ yerleri 1-Adana, 2-Ankara, 8-Mersin, 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ'sü iken, Şekil 3.4(b)'deki ADÜ'ler 2-Ankara, 7-Gaziantep, 10-İzmir, 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ'leridir. Şekil 3.4(a)'nın ADÜ yerleri harita üzerinde daha merkezde ve

birbirlerine yakın olacak şekilde, Şekil 3.4(b) ise 3 ADÜ'sünün Şekil 3.3(a) ile aynı olmasına rağmen 10-İzmir ADÜ'sünün biraz daha batıda yer aldığı görülmektedir.

Şekil 3.4(a)'da yer alan TR.16.5.1 $\alpha=1$ probleminin amaç fonksiyonu değeri Tablo 3.6'da görüldüğü üzere 2.200 km iken, Şekil 3.4(b)'de yer alan TR.16.5.1 $\alpha=1$ probleminin amaç fonksiyonu değeri 2.356 km'dir. Şekil 3.4(a)'nın en büyük rota uzunluğu 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ'lerinden gelirken; Şekil 3.4(b)'de en büyük rota uzunluğu tahmin edilebileceği gibi 2-Ankara ve 14-Sivas ADÜ'lerinden oluşmuştur. Tablo 3.6'da yer alan problemler karşılaştırıldığında her bir ADÜ'nün diğer ADÜ'lere olan toplam uzaklığı hesaplandıktan sonra elde edilen ADÜ yerlerinin kullanıldığı model sonuçlarının genel olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. ADÜ yerleriyle ilgili olarak rotaların merkezde ve birbirlerine yakın konumlandırılması amaç fonksiyonu değerini olumlu yönde etkilemektedir.

Özetle, ADÜ yerlerinin diğer ADÜ'lere olan toplam uzaklıklarının minimum olanlarının ve p-ADÜ merkez probleminin girdileriyle seçilerek çözülmesi sonucu amaç fonksiyonu ve rotalar arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Dolayısıyla karar vericiler/yöneticiler, operasyonel kararlar alırken bu modellerden faydalanabilirler. Modellerde, her bir ADÜ'ye atanan araç sayılarının ve ADÜ sayılarının rotadaki en büyük uzaklık değerini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Karar vericilerin, maliyet faktörlerini göz önünde bulundurarak yapacakları yatırımlar gereksiz maliyetlerin oluşmasına engel olurken, toplam uzaklık değerinin azalmasını sağlayabilecektir. Problemler incelendiğinde ADÜ sayısının artmasıyla amaç fonksiyonu değerlerinin, araç sayısının 1'den daha fazla olduğu durumlarda çözüm sürelerinin ve model çözümü için gerekli dal-sınır ağacı sayılarının düştüğü görülmektedir.

İzleyen bölümde literatüre yeni sunulan “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi”, probleme ait matematiksel model, simetri bozma kısıtı, geçerli eşitsizlikler ve sayısal sonuçları sunulmaktadır.

4. TEK ATAMALI SABİT YERLEŞİMLİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ MERKEZ ROTALAMA VE EKSİK BAĞLANTILI AĞ TASARIMI PROBLEMİ

Bu bölümde literatüre yeni sunulan 4 indisli SADÜMRP modeline eksik bağlantılı ADÜ ağ tasarımı kararları eklenerek “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi (SEADÜMRP)” ele alınacaktır. Bölüm 4.1’de problemin tanıtımı, matematiksel modeli, Bölüm 4.1.1’de modelin çözüm süresinin hızlanmasını sağlayan simetri bozma kısıtı ve Bölüm 4.1.2’de problem için geliştirilmiş olan geçerli eşitsizliklere yer verilmiştir. Bölüm 4.2’de ise önerilen SEADÜMRP’ne ilişkin sayısal sonuçlar sunulmuştur.

4.1. Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi

ADÜ merkez rotalama ve eksik bağlantılı ağ tasarımı problemi, ADÜ’lerin yerlerinin bulunması, talep merkezlerinin hangi ADÜ’lere atanacağını ve kaynak-varış noktası çifti arasındaki en büyük mesafe/seyahat süresinin en küçük olacak şekilde araç rotalarını bulan aynı zamanda açılacak ADÜ’lerin her birinin birbiriyle doğrudan bağlantı yapmadan ADÜ’ler arasında toplam kat edilecek mesafenin azaltılmasının amaçlandığı bir problem türüdür. Ancak bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi ADÜ yerlerinin belirlenmesi uzun dönemli, yüksek maliyetli stratejik kararlar içerdiğinden ADÜ yerlerinin belirli olduğu varsayılan SEADÜMRP literatüre ilk defa sunulmuştur. SEADÜMRP modeli, Alumur vd. (2009) tarafından kullanılan kapsayan ağaç değişkeni geliştirmeye bağlı formülasyonun bir önceki bölümde geliştirilen SADÜMRP matematiksel programlama modeline entegre edilerek oluşturulmuştur.

Önerilen, SEADÜMRP modeli 4 indisli olup, bölüm 3.1.’de de belirtildiği gibi n talep düğümünden oluşan küme “ N ”, ADÜ olan düğümlerin oluşturduğu küme “ H ”, ADÜ olmayan düğümlerin oluşturduğu küme “ NH ” olarak adlandırılmıştır. Rotalarda sınırlı sayıda homojen olan ve kapasite sınırı olmayan $v \in V$ araç filosunun çalıştığı varsayılmıştır. Gerçek hayatta, her ADÜ’ye atanacak araç sayılarının bilindiği varsayılır. Gösterimde ve testlerde kolaylık olması açısından her ADÜ’nün eşit sayıda araca sahip olduğu varsayılmıştır. Ancak modelde araç sayıları istenen şekilde değiştirilebilmektedir. 4 indisli $O(n^3)$ karmaşıklığındaki SEADÜMRP matematiksel modelinde bir önceki bölümde verilmiş olan parametre, karar değişkenleri ve kısıtlara ek olarak gereken veriler *Model-4.1*’de sunulmuştur.

Yeni Karar değişkenleri

$$lk_{ij} = \begin{cases} 1, i \text{ ADÜ'sü ile } j \text{ ADÜ'sü arasında link kuruluyorsa} \\ 0, \text{d. d.} \end{cases}$$

$$y_{ijk} =$$

$$\begin{cases} 1, \text{ eğer kapsayan ağaç } k \text{ ADÜ'sünden başlayarak } i \text{ ve } j \text{ ADÜ'lerini ziyaret ediyorsa} \\ 0, \text{d. d.} \end{cases}$$

$$t_{ij} = \text{ADÜ tasarım ağında } i \text{ ADÜ'sünden } j \text{ ADÜ'süne seyahat mesafesi}$$

Yeni Parametreler

$$q = \text{Açılacak ADÜ'ler arasında kurulacak link sayısı}$$

Model-4.1:

$$\text{Enk} = \text{Enb} (Z)$$

$$\sum_i h_i = p \quad (3.1)$$

$$\sum_v \sum_{j \neq i} x_{ij}^v - \sum_v z_{iv} = 1 - h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.2)$$

$$z_{iv} \leq \sum_{j \neq i, j \in NH} x_{ij}^v \quad \forall i \in H, v \in V, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in H} z_{iv} = 1 \quad \forall v \in V, \quad (3.4)$$

$$\sum_v z_{iv} = h_i * n_i \quad \forall i \in H, \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \neq i} x_{ij}^v - \sum_{j \neq i} x_{ji}^v = 0 \quad \forall i \in N, v \in V, \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \neq i, j \in NH} x_{ij}^v - 1 + h_i \leq z_{iv} \quad \forall i \in N, v \in V, \quad (3.7)$$

$$u_i - u_j + L * \sum_v x_{ij}^v + (L-2) * \sum_v x_{ji}^v \leq L - 1 \quad \forall i \in NH, j \in NH: i \neq j, \quad (3.8)$$

$$\text{collect_sum}_{kv} \geq \sum_i \sum_j (d_{ij} * \text{collect}_{kij}^v) \quad \forall k \in N, v \in V, \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in H} \text{collect}_{kij}^v = x_{ij}^v \quad \forall i \in N, j \in NH, v \in V: j \neq i, \quad (3.10)$$

$$\text{collect}_{kij}^v \leq x_{ij}^v \quad \forall i \in N, j \in NH, k \in H, v \in V, \quad (3.11)$$

$$\text{collect}_{kij}^v \leq z_{kv} \quad \forall i \in N, j \in NH, k \in H, v \in V, \quad (3.12)$$

$$\text{distribute_sum}_{iw} \geq \sum_i \sum_j (d_{ij} * \text{distribute}_{ijk}^w) \quad \forall i \in H, w \in V, \quad (3.13)$$

$$\text{distribute}_{ijk}^w \leq x_{ij}^w \quad \forall i \in NH, j \in N, k \in H, w \in V: j \neq i, \quad (3.14)$$

$$\sum_{k \in H} \text{distribute}_{ijk}^w = x_{ij}^w \quad \forall i \in NH, j \in N, w \in V: j \neq i, \quad (3.15)$$

$$\text{distribute}_{ijk}^w \leq z_{kw} \quad \forall i \in NH, j \in N, k \in H, w \in V, \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \neq i} \sum_v x_{ij}^v = 1 + (n_i - 1) * h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \neq i} \sum_v x_{ji}^v = 1 + (n_i - 1) * h_i \quad \forall i \in N, \quad (3.18)$$

$$Z \geq (\text{collect_sum}_{kv} + \text{distribute_sum}_{kw}) \quad \forall k \in N, v \in V, w \in V: v \neq w, \quad (3.20)$$

$$Z \geq \sum_i \sum_{j \neq i} (d_{ij} * x_{ij}^v) - d_{kl} * x_{kl}^v - M * (1 - x_{kl}^v) \quad \forall k \in N, l \in N, v \in V, \quad (3.21)$$

$$Z \geq (\text{collect_sum}_{kv} + \text{distribute_sum}_{iw} + \alpha * t_{ik}) \quad \forall i \in H, k \in H, v \in V, w \in V: i \neq k, v \neq w, \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j > i; j \in H} lk_{ij} = q \quad (4.2)$$

$$lk_{ij} \leq h_i \quad \forall i \in H, j \in H: i < j, \quad (4.3)$$

$$lk_{ij} \leq h_j \quad \forall i \in H, j \in H: i < j, \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \neq j; i \in H} y_{ijk} \leq h_k \quad \forall j \in H, k \in H: j \neq k, \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \neq j; i \in H} y_{ijk} \leq h_k + h_j - 1 \quad \forall j \in H, k \in H: j \neq k, \quad (4.6)$$

$$t_{kk} = 0 \quad \forall k \in N, \quad (4.7)$$

$$t_{kj} \geq t_{ki} + d_{ij} * y_{ijk} - M * (1 - y_{ijk}) \quad \forall i \in H, j \in H, k \in H: i \neq j, j \neq k, \quad (4.8)$$

$$t_{ij} = t_{ji} \quad \forall i \in H, j \in H, \quad (4.9)$$

$$t_{ij} \geq d_{ij} \quad \forall i \in H, j \in H. \quad (4.10)$$

$$z_{iv}, x_{ij}^v, h_i, \text{distribute}_{ijk}^w, \text{collect}_{kij}^v, lk_{ij}, y_{ijk} \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

$$u_i, \text{collect_sum}_{kv}, \text{distribute_sum}_{iw}, Z, t_{ij} \geq 0 \quad (4.12)$$

SEADÜMRP'e ait karma tamsayıli matematiksel programlama modelinin amaç fonksiyonu, bir önceki bölümde geliştirilerek literatüre sunulan SADÜMRP ile aynıdır. SADÜMRP için geliştirilen üç ayrı kısıtın sağlanmasından oluşan amaç fonksiyonu hesaplaması, SEADÜMRP için sadece bir kısıtın sağlanmasındaki farklılık ile ayrılmaktadır. Bu farklılık ADÜ'ler arasındaki eksik bağlantılı ağ tasarımı kaynaklanmaktadır. Buna göre, ADÜ'lerin tümü arasında karşılıklı bağlantı olması yerine, çoğu gerçek hayat probleminde olduğu gibi, aktarmalı ulaşımaya uygun olarak eksik bağlantılı ADÜ ağ tasarımı oluşturulmuştur. Bu durumu belirten durum kısıt 4.1'de

verilmiştir. SADÜMRP’den farklı olarak, ADÜ ağ tasarımına ilişkin kısıtlar farklılaşmaktadır. (3.1)-(3.18) kısıtları *Model-3.1*’de (SADÜMRP) yer alan kısıtlarla özdeştir.

Kısıt (4.2) ‘ q ’ sayıda ADÜ linkinin kurulmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.3) ve kısıt (4.4) kurulacak ADÜ linklerinin, her iki uç düğümünde ADÜ olması durumunda bağlantı oluşturulabileceğini garantilemektedir. Kısıt (4.5), k ADÜ’sünden başlayan kapsayan ağacın en fazla bir diğer ADÜ düğüme girmesini ve kapsayan ağacın ADÜ olmayan düğümlerde 0 değerini almasını sağlamaktadır. Kısıt (4.6) ise ADÜ ağına birden fazla ADÜ’nün kurulacağı durumda her ADÜ’nün en az bir link kurmasını garantilemektedir. Kısıt (4.7) bir düğümün kendine olan uzaklığının 0 olmasını garantilemektedir. Kısıt (4.8) bir ADÜ’den başka bir ADÜ’ye kapsayan ağacın kurulacak linkleri üzerinden gidiş süresini hesaplamaktadır. Kısıt (4.9) zaman/maliyet verilerinin simetrik olmasını belirtmektedir. Kısıt (4.10), ADÜ tasarım ağındaki i ADÜ’sünden j ADÜ’süne seyahat mesafesinin en az i ADÜ’sü ve j ADÜ’sü arasındaki mesafe kadar olmasını garantiler.

Bu model en kötü senaryoda $|NH|=n$, $|H|=n$ ve $|V|=v$ olduğu durumda, modelde $(2n^3v+n^3+n^2+n^2v+nv+n)$ 0-1 tamsayıli değişkene, $(n+2nv+n)$ sürekli değişkene ve $(4n^3v+n^3+n^2v^2+3n^2v+nv^2+7n^2+5nv+5n+v)$ kısıta sahiptir.

Anlatılanlardan hareketle SEADÜMRP problemi her i ve j düğümü arasındaki en büyük uzaklığı en küçükleyecek şekilde, ADÜ olmayan düğümlerin hangi ADÜ’nün hangi aracında yer alacağını, ADÜ ağ yapısında hangi ADÜ linklerinin kurulacağını; bu amaçları sağlayacak şekilde araç rotalarının oluşturulmasını sağlamaktadır.

4.1.1. Simetri Bozma Kısıtı

Bölüm 3.1.1’de SADÜMRP için geliştirilen simetri bozma kısıtının etkililiği, bu bölümde SEADÜMRP için de test edilmiştir.

SEADÜMRP’nin simetri bozma kısıtı dahil olmayan *Model-4.1* ve simetri bozma kısıtının dahil olduğu *Model-4.1(A)*’nın test sonuçları Tablo 4.1’de yer almaktadır. Tablo 4.1’deki ilk sütun ‘ $p.v.$ ’ ile ‘ p ’ kurulacak ADÜ sayısını ve ‘ v ’ her ADÜ’ye atanan araç sayısını, ikinci sütun ‘ q ’ ADÜ’ler arasındaki kurulacak link sayısını, , üçüncü sütun ‘ α ’ ölçek ekonomisini, dördüncü sütun ise problemlere parametre olarak girilen ADÜ yerlerini göstermektedir. Beşinci ve altıncı sütunlar önerilen modelin çözüm süresi (sn değerleri ve dal-sınır ağacı sayısı değerleri, yedinci ve sekizinci sütunlarda simetri bozma

kısıtının dahil olduğu probemlerin çözüm süresi (sn) değerleri ve dal-sınır ağacı sayısı değerleri ve dokuzuncu sütunda ise problemlerin amaç fonksiyonu değerleri yer almaktadır.

Tablo 4.1. Model-4.1 ve Model-4.1(A) TR.16 [(p=4 q=4, 6), (p=5 q=6, 10)] v=1,2 $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Üzerinde Sayısal Sonuçlar

				Model-4.1		Model-4.1 (A)		
p.v.	q	α	Sabit ADÜ Yeri	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Amaç Fnk.
4.1.	4	1	1, 2, 11, 14	55	11.958	22,766	4.520	2.530
		0.8		75,515	7.276	30,735	7.100	2.444,40
		0.6		63,906	8.478	42	8.801	2.358,80
		0.4		63,812	7.855	27,297	6.086	2.273,20
		0.2		62,172	7.832	34,453	8.207	2.187,60
4.1.	6	1	1, 2, 11, 14	37,328	5.754	18,172	3.521	2.530
		0.8		54,703	6.810	22,515	4.326	2.444,40
		0.6		41,469	5.806	29,875	4.158	2.358,80
		0.4		36,687	5.547	53	6.012	2.273,20
		0.2		51,937	7.161	29,953	5.307	2.187,60
4.2.	4	1	1, 2, 11, 14	105,188	5.396	103,437	8.158	1.807
		0.8		133,578	13.208	165,016	14.497	1.707
		0.6		183,719	12.775	256,562	26.200	1.611
		0.4		126,766	5.293	237,859	19.780	1.511
		0.2		75,047	4.009	82,25	6.174	1.411
4.2.	6	1	1, 2, 11, 14	108,39	3.262	32,656	4.309	1.771
		0.8		54,703	6.810	22,515	4.326	2.444,40
		0.6		114,797	4.645	64,625	6.152	1.611
		0.4		94,187	6.885	56,25	5.547	1.511
		0.2		93,968	1.840	48,984	4.794	1.411
5.1.	6	1	1, 2, 8, 11, 14	65,125	5.690	46,985	5.354	2.200
		0.8		52,375	3.998	52,641	9.811	2.108,80
		0.6		51,734	3.816	38,484	5.646	2.037,60
		0.4		58,906	4.574	39,547	5.222	1.939
		0.2		61,421	5.915	29,984	4.300	1.839
5.1.	10	1	1, 2, 8, 11, 14	57,563	3.343	23	4.409	2.200
		0.8		45,641	3.678	17,922	3.182	2.108,80

		0.6		53,406	4.316	16,563	3.458	2.037,60
		0.4		47,75	3.603	18,532	2.972	1.939
		0.2		46,609	2.943	19,078	4.480	1.839
5.2.	6	1	1, 2, 8, 11, 14	2.415,14	627	24,719	2.380	1.602
		0.8		13.705,15	178.144	23,672	3.305	1.488,40
		0.6		2.042,94	1.065	14,484	1.149	1.341,80
		0.4		1.641,66	1.013	11,609	424	1.252,40
		0.2		6.139,67	11.727	9,625	40	1.181,20
5.2.	10	1	1, 2, 8, 11, 14	2.537,13	1.112	8,672	7	1.521
		0.8		2.813,80	1.195	9,391	8	1.421
		0.6		1.527,41	1.114	8,734	7	1.323,60
		0.4		734,687	2.271	10,39	379	1.252,40
		0.2		1.930,52	960	10,156	192	1.181,20
			Toplam Süre	37.729,118		1.870,874		
			Ortalama Süre	943,228		46,7719		

Bu bölümde yer alan çözümler için ' $TR.n.p.v.q.$ ve α ' şeklinde bir kısaltma kullanılacaktır. Kısaltmada yer alan ' n ' düğüm sayısı, ' p ' açılacak ADÜ sayısı, ' v ' ADÜ'lere atanan araç sayısı, ' q ' kurulacak ADÜ linki sayısını ve ' α ' indirim katsayısı değerini belirtmektedir.

Tablo 4.1 incelendiğinde çözüm süreleri ve problem çözümü için türetilen dal-sınır ağacı sayıları arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. (A) kısıtının dahil olmadığı TR.16.5.2.6 $\alpha=0,8$ probleminin en büyük çözüm süresi 13.705,151 saniye iken en büyük dal-sınır ağacı sayısı 178.144 değerine sahiptir. ' α ' değeri 0,6'ya düşürüldüğünde çözüm süresinin 2.042,94 saniyeye ve dal-sınır ağacı sayısının 1.065 değerine düştüğü, $\alpha=0,4$ olduğunda ise çözüm süresinin 1.641,66 saniyeye ve dal-sınır ağacı sayısının 1.013 değerine düşmüştür. ' α ' değeri 0,2'ye düşürüldüğü zaman ise çözüm süresinin 6.139,67 saniyeye ve dal-sınır ağacı sayısının da 11.727'ye yükseldiği gözlenmektedir. Bunun nedeninin, rotaların oluşturulmasıyla ilgili bir zorluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. (A) kısıtının dahil olduğu durumda ise TR.16.4.2.4 ve $\alpha=0,6$ problemi de en büyük çözüm süresi değeri 256,522 saniye ve en büyük dal-sınır ağacı sayısı değeri 26.200 olmuştur. ' α ' değeri arttırıldığında ve azaltıldığında çözüm süresi ve dal-sınır ağacı sayıları birlikte azalmışlardır.

Model-4.21'in toplam çözüm süresi 37.729,118 saniye iken *Model-4.1(A)*'nın toplam çözüm süresi 1.870,874 saniyedir. *Model-4.1(A)*'nın toplam çözüm süresi ve ortalama çözüm süresi *Model-4.1*'in toplam çözüm süresi ve ortalama çözüm süresinden daha kısa sürdüğü için ilerleyen bölümlerde yapılan SEADÜMRP testlerinde *Model-4.1(A)* kullanılmıştır.

4.1.2. Geçerli Eşitsizlikler

Bölüm 3.1.2.'de belirtildiği gibi geçerli eşitsizlikler, çözüm uzayını daraltarak modelin çözülmesi için gereken süreyi kısaltan kısıtlardır.

İlk geçerli eşitsizlik Bölüm 3.1.2.'de bahsedilen SEADÜMRP (B) geçerli eşitsizliğidir.

SEADÜMRP için Campbell vd. (2005b) tarafından sunulan, Alumur ve Kara (2009) tarafından geliştirilen, sunulan modele de uyarlanabilen iki adet geçerli eşitsizlik sunulmuştur.

İkinci geçerli eşitsizlik ise ADÜ tasarım ağlarının kurulmasındaki link sayılarına ilişkin olarak geliştirilmiştir. (C) olarak adlandırılan bu geçerli eşitsizlik aşağıda verilmiştir:

$$\sum_{i \in H} \sum_{j > i; j \in H} lk_{ij} \geq \sum_i h_i - 1 \quad (C)$$

(C) geçerli eşitsizliği bir ağ tasarımındaki en küçük link sayısının; “ağ tasarımında yer alan düğüm sayısı-1” olmasını garantilemektedir. Bu durum göz önüne alındığında (C) kısıtı ile, ADÜ’ler arasında kurulacak toplam link sayısının en az (açılacak toplam ADÜ düğüm sayısı – 1)’den ve/veya daha fazla olması gerektiğini belirtilmektedir.

(D) olarak adlandırdığımız son geçerli eşitsizlik ise, ADÜ tasarım ağının kurulması ile ilgili olarak oluşan mesafelerle ilgilidir:

$$t_{ij} \geq \alpha^* \min_{k \in H: k \neq i, j} (d_{ik} + d_{kj})^* (1 - lk_{ij}) \quad \forall i \in H, j \in H: i < j \quad (D)$$

Bu geçerli eşitsizlik için uzaklıklarla ilgili olarak yeni bir parametre tanıtilmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu parametre ‘ t_{ij} ’ dir. ‘ t_{ij} ’ hesaplanırken $\min_{k \in H: k \neq i, j} (d_{ik} + d_{kj})$ değeri kullanılmıştır. Bu geçerli eşitsizlik, i ADÜ’sünden j ADÜ’süne gidilirken, arada mutlaka bir tane k ADÜ’sünün bulunmasını garantiler.

Model-4.1(A) ve bu modele (B), (C) ve (D) kısıtları ve tüm olası kombinasyonları eklenerek oluşturulmuş modeller ve test sonuçları Tablo 4.2’de yer almaktadır. Tablo 4.2’de yer alan ilk sütundaki ‘p.v.’ ile ‘p’ açılacak ADÜ sayısı ve ‘v’ her bir ADÜ’ye atanan araç sayısı değeri, ölçek ekonomisi, ikinci sütunda yer alan ‘q’ ADÜ’ler arasında kurulacak link sayısını, üçüncü sütunda yer alan ‘ α ’ indirim katsayısı değeri yer almaktadır. Dördüncü sütunda ADÜ yerleri, *Model-4.1*’e (A) kısıtının eklendiği sonuçlar beşinci sütunda, (A) ve (B) kısıtlarının eklendiği sonuçlar altıncı sütunda, (A) ve (C) kısıtlarının eklendiği sonuçlar yedinci sütunda, (A) ve (D) kısıtlarının eklendiği sonuçlar sekizinci sütunda, (A), (B) ve (C) kısıtlarının eklendiği sonuçlar dokuzuncu sütunda, (A), (B) ve (D) kısıtlarının eklendiği sonuçlar onuncu sütunda, (A), (C) ve (D) kısıtlarının eklendiği sonuçlar on birinci sütunda, (A), (B), (C) ve (D) kısıtlarının eklendiği sonuçlar on ikinci sütunda ve on üçüncü sütunda ise toplam maliyet değerleri yer almaktadır.

Tablo 4.2. Model-4.1(A) ve Geçerli Eşitsizlikler Kullanılarak Oluşturulmuş TR.16 Veri Seti Test Sonuçları

				Model-4.1 (A)	Model-4.1 (A+B)	Model-4.1 (A+C)	Model-4.1 (A+D)	Model-4.1 (A+B+C)	Model-4.1 (A+B+D)	Model-4.1 (A+C+D)	Model-4.1 (A+B+C+D)	
p.v.	q	α	Sabit ADÜ Yeri	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Çözüm Süresi (sn)	Amaç Fnk.
4.1.	4	1	1, 2, 11, 14	22,766	34,735	22,844	30,563	33,593	29,11	30,25	29,704	2.530
		0,8		30,735	37,172	31,328	24,328	38,046	40,828	28,281	39,469	2.444,40
		0,6		42	32,25	40,812	27,391	34,063	36,782	27,937	35,875	2.358,80
		0,4		27,297	52,094	28,39	28,234	52,031	28,328	27,828	27,859	2.273,20
		0,2		34,453	34,719	34,141	34,797	34,187	34,281	34,656	34,125	2.187,60
4.1.	6	1	1, 2, 11, 14	18,172	28,906	18,266	18,046	27,531	27,156	18,063	27,922	2.530
		0,8		22,515	26,282	23,422	22,782	26,39	26,266	24,719	25,187	2.444,40
		0,6		29,875	37,188	29,297	29,578	39,515	38,938	29,578	37,454	2.358,80
		0,4		53	54,875	51,829	54,547	54,188	53,672	54,704	51,969	2.273,20
		0,2		29,953	29,172	29,032	29,593	29,297	28,546	29,297	28,25	2.187,60
4.2.	4	1	1, 2, 11, 14	103,437	44,25	102,953	79,062	43,484	66,86	78,938	66,782	1.807
		0,8		165,016	141,281	171,391	141,953	138,11	115,453	142,797	116,218	1.707
		0,6		256,562	209,125	276,297	261,312	215,297	182,938	261,891	180,657	1.611
		0,4		237,859	169	263,594	115,422	168,109	178,735	114,703	175,484	1.511
		0,2		82,25	104,25	81,735	82,172	104,594	101,125	82,219	101,64	1.411
4.2.	6	1	1, 2, 11, 14	32,656	40,906	33	32,109	41,609	41,954	33,031	40,625	1.771
		0,8		78,281	88,531	80,797	80,468	86,86	87,796	77,625	86,437	1.707
		0,6		64,625	70,485	63,219	63,14	69,188	66,313	62,531	69,468	1.611
		0,4		56,25	67,859	57,157	57,64	72,61	67,594	56,391	67,985	1.511
		0,2		48,984	55,25	49,687	50,234	55,031	54,859	50,594	53,468	1.411
5.1.	6	1	1, 2, 8, 11, 14	46,985	60,461	46,907	29	62,14	75,218	29,141	71,031	2.200
		0,8		52,641	33,328	52,672	28,485	33,094	38,25	26,453	37,766	2.108,80
		0,6		38,484	40,047	39,094	62,609	40,344	59,906	59,859	59,797	2.037,60
		0,4		39,547	42,141	41,391	34,125	43,796	33,5	33,875	33,265	1.939

		0.2		29,984	29,593	31,344	27,672	29,891	26,968	28	27,969	1.839
5.1.	10	1	1, 2, 8, 11, 14	23	18,297	21,985	24,062	18,5	19,328	22,25	18,547	2.200
		0,8		17,922	27,906	17,812	17,891	30,016	28,015	17,594	27,906	2.108,80
		0,6		16,563	18,141	16,672	19,14	16,422	16,828	16,297	16,61	2.037,60
		0,4		18,532	19,125	19,625	19,36	19,14	19,438	19,094	19,11	1.939
		0.2		19,078	18,641	19,438	19,235	19,719	18,985	19,125	19,094	1.839
5.2.	6	1	1, 2, 8, 11, 14	24,719	21,797	24,562	20,172	21,86	23,516	20,609	22,765	1.602
		0,8		23,672	24,11	23,187	15,234	26,296	17,563	15,094	17,5	1.488,40
		0,6		14,484	15,859	13,765	15,343	15,015	12,36	14,047	12,109	1.341,80
		0,4		11,609	11,875	12,109	14,766	11,89	13,782	15,797	13,172	1.252,40
		0.2		9,625	10,578	10,047	9,89	10,312	10,063	9,735	9,859	1.181,20
5.2.	10	1	1, 2, 8, 11, 14	8,672	9,625	8,578	8,719	9,734	10,641	8,828	10,11	1.521
		0,8		9,391	9,422	8,797	9,063	11,25	9,047	9,281	9,437	1.421
		0,6		8,734	9,047	9,079	9,296	8,969	9	8,828	9,11	1.323,60
		0,4		10,39	11,5	10,625	10,703	11,359	11,594	10,719	11,703	1.252,40
		0.2		10,156	10,406	10,344	10,406	10,641	10,672	10,187	10,609	1.181,20
			Toplam Süre	1.870,87	1.800,23	1.927,22	1.668,54	1.814,12	1.772,21	1.660,85	1.754,05	
			Ortalama Süre	46,7719	45,0057	48,1806	41,7136	45,353	44,3052	41,5212	43,8512	

Model-4.1(A)'nin çözümlerinin toplam süresi 1.870,874 saniye iken, *Model-4.1(A+B)*'nin çözümlerinin toplam süresi 1.800,229 saniye, *Model-4.1(A+C)*'nin çözümlerinin toplam süresi 1.927,224 saniye, *Model-4.1(A+D)*'nin çözümlerinin toplam süresi 1.668,542 saniye olmuştur. *Model-4.1(A+B+C)*'nin çözümlerinin toplam süresi 1.814,121 saniye, *Model-4.1(A+B+D)*'nin çözümlerinin toplam süresi 1.772,208 saniye, *Model-4.1(A+C+D)*'nin çözümlerinin toplam süresi ise 1.660,846 saniye olurken üç eşitsizliğin aynı anda eklendiği *Model-4.1(A+B+C+D)* toplam çözüm süresi 1.754,047 saniye olmuştur. Toplam süreler incelendiğinde en iyi toplam çözüm süresi ve ortalama çözüm süresi *Model-4.1(A+C+D)* deneylerinde gerçekleşmiştir. Bu yüzden ilerleyen bölümlerde yapılan SEADÜMRP deneylerinde (A+C+D) kısıtlarının yer aldığı *Model-4.1* kullanılmıştır. Bundan sonraki deneylerde de bahsedilen model *Model-4.1* olarak anılacaktır.

Tablo 4.2'de yer alan deneylerin her birinin Doğrusal programlama (DP) gevşetme (LP relaxation) değerleri bulunmuştur. DP gevşetme değerleri modelde yer alan tam sayı ve ikilik değişkenlerinin kaldırılıp bütün değişkenlerin sürekli değişken olduğu durumda bulunan amaç fonksiyonu değeridir. DP gevşetme değerinin sıkı olması çoğu durumda modelin daha hızlı çözülmesini sağlamaktadır. Önerilen çözüm problemlerinin her birinin DP gevşetme değerleri bulunmuştur ancak yapılan deneylerde Tablo 4.2'de belirtilen

sütunlardaki örneklere ilişkin olarak DP değerlerinde anlamlı bir farklılık bulunmadığından, çalışmada yer verilmemesine karar verilmiştir.

Bir sonraki bölümde Bölüm 4.1.'de kısıtları anlatılan ve testleri yapılan *Model-4.1* üzerinde gerçekleştirilen sayısal sonuçlar anlatılacaktır.

4.2. Sayısal Sonuçlar

SEADÜMRP için geliştirilen *Model-4.1* kullanılarak Türkiye Posta veri seti üzerinde ve daha önce de belirtilen 16 düğüm kullanılarak (TR.16) deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, deney sonuçlarının yer aldığı tablolar '*p*' ve '*q*' değerlerine göre gruplandırılmıştır.

Tablo 4.3'te geliştirilen model TR.16 veri seti $p=3$, $q=2$ olduğunda yapılan deney sonuçlarını içermektedir. Tablo 4.3'teki ilk sütunda yer alan '*p.v.*' ile '*p*' açılacak ADÜ sayısı ve '*v*' ile her bir ADÜ'ye atanan araç sayısı, ikinci sütunda yer alan '*α*' ölçek ekonomisi, üçüncü sütunda ADÜ yerleri, dördüncü sütunda ADÜ'ler arasında kurulan linkler, beşinci sütunda amaç fonksiyonu değerleri, altıncı sütunda *Model-4.1*'in amaç fonksiyonu değeriyle *Model-3.1*'in amaç fonksiyonu değeri arasındaki artış yüzdesi, yedinci sütunda çözüm süresi (sn) değerleri, sekizinci sütunda modellerin çözülmesi için gereken dal-sınır ağacı sayısı, ve son sütunda ise araçların oluşturduğu rotalar yer almaktadır.

Kurulacak ADÜ linklerinin sayısı daha önce de belirtildiği gibi en az $(n-1)$ 'dir. Açılacak ADÜ sayısı 3 olduğunda, kısıtları sıkı bir problem oluşturulmak istendiği için seyrek bir tasarım ağı oluşturulmak istenmiş, bu sebeple de $q=2$ olarak belirlenmiştir. ADÜ linklerinin sayısı en fazla $(2n)$ olabilmektedir. Her ADÜ çifti arasına bir geliş bir de dönüş linki eklendiğinde tam bağlı bir ADÜ ağı tasarlanmış olmaktadır. Ancak bu bölümde ilk olarak eksik bağlantılı ADÜ ağ tasarımına sahip modellerin tam bağlı modeller ile aralarındaki benzerlikler ve farklılıklar incelenmek istenmiştir.

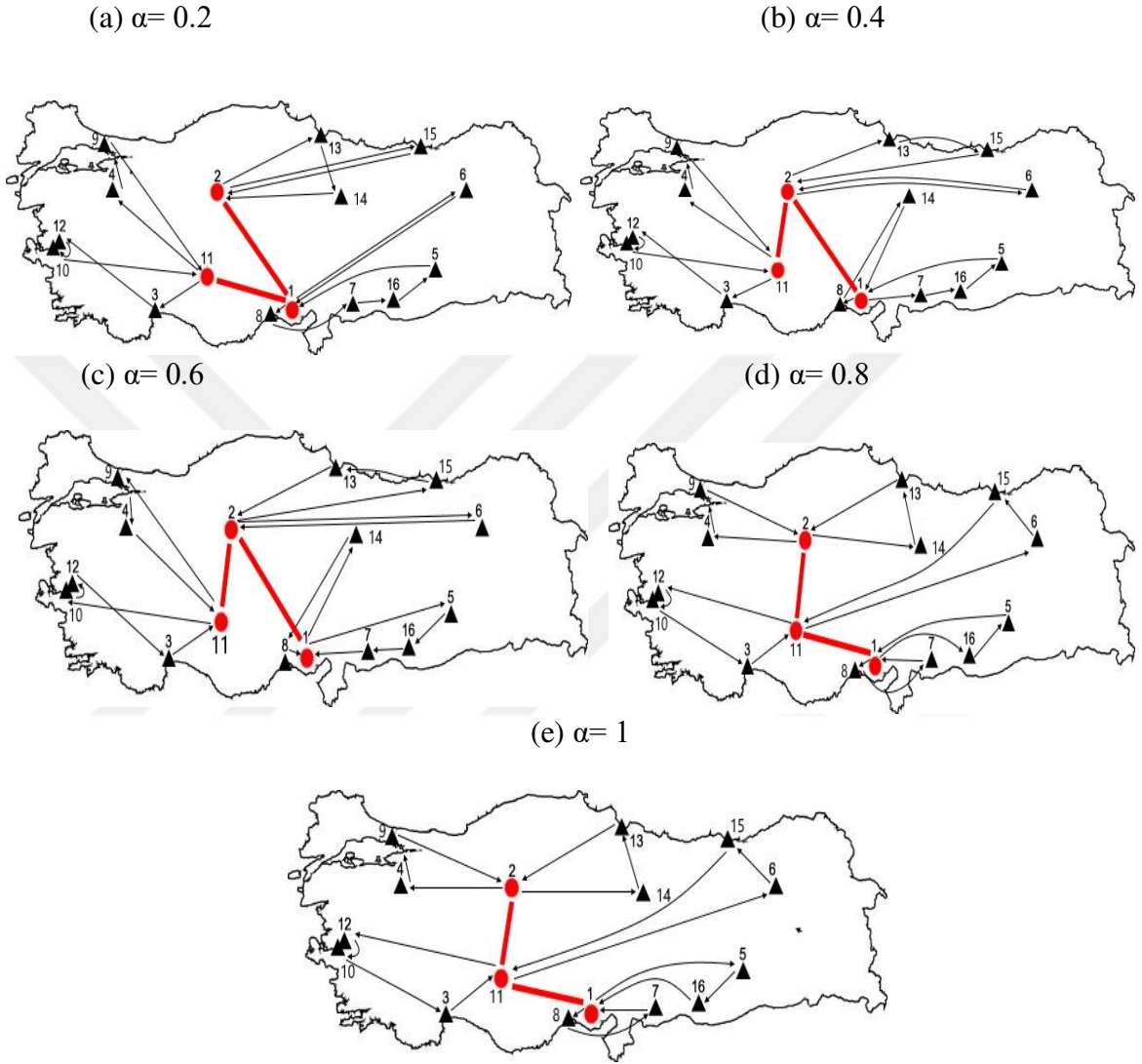
Bu bölümde yer alan bütün tablolarda bulunan amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi değerleri SEADÜMRP modeli kullanılarak elde edilen toplam uzaklık değerinden tam bağlı ADÜ ağının toplam uzaklık değerleri çıkarılmış, elde edilen değer tam bağlı ADÜ ağının toplam uzaklık değerine bölünmüş ve sonra da 100'le çarpılarak elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Model-4.1 TR.16 $p=3$, $v=1,2,3$ $q=2$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=2								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
3.1.	1	1, 2, 11	1-11; 2-11	3.279	2,789	16,86	4.431	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
	0,8		1-11; 2-11	3.156,20	1,119	27,985	8.905	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
	0,6		1-11; 2-11	3.047,60	0	18	5.039	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2; 11-3-10-12-4-9-11
	0,4		1-11; 2-11	2.976,40	0	14,141	2.946	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2; 11-3-10-12-4-9-11
	0,2		1-11; 2-11	2.909,60	0	27,391	7.709	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2; 11-3-10-12-4-9-11
3.2.	1	1, 2, 11	1-11; 2-11	2.283	0	615,422	36.276	1-5-16-1; 1-8-7-1; 2-4-9-2; 2-14-13-2; 11-6-15-11; 11-12-10-3-11
	0,8		1-11; 2-11	2.239	2,098	328,141	46.174	1-8-7-1; 1-16-5-1; 2-4-9-2; 2-14-13-2; 11-6-15-11; 11-12-10-3-11
	0,6		1-2; 2-11	2.160,80	3,141	926,828	59.035	1-5-16-7-1; 1-14-8-1; 2-6-2; 2-15-13-2; 11-9-4-11; 11-10-12-3-11
	0,4		1-2; 2-11	2.011,20	0,5	205,984	27.861	1-7-16-5-1; 1-8-14-1; 2-6-2; 2-13-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
	0,2		1-2; 1-11	1.978	0	1.269,70	149.915	1-6-1; 1-8-7-16-5-1; 2-13-14-2; 2-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
3.3.	1	1, 2, 11	1-11; 2-11	1.888	0	244,813	22.659	1-5-1; 1-14-1; 1-16-7-1; 2-9-4-2; 2-10-12-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-6-11; 11-15-11
	0,8		1-11; 2-11	1.856	0	355,625	31.785	1-5-1; 1-14-1; 1-16-7-1; 2-9-4-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-6-11; 11-15-11
	0,6		1-2; 1-11	1.840	0	234	27.426	1-6-1; 1-7-5-16-1; 1-15-1; 2-3-2; 2-9-4-2; 2-13-2; 11-8-11; 11-12-10-11; 11-14-11
	0,4		1-2; 1-11	1.742	0	332,906	37.436	1-5-16-7-1; 1-6-1; 1-15-1; 2-8-2; 2-9-4-2; 2-14-2; 11-3-11; 11-12-10-11; 11-13-11
	0,2		1-2; 2-11	1.672	0	283,125	31.589	1-6-1; 1-8-7-1; 1-16-5-1; 2-4-9-2; 2-10-12-2; 2-15-2; 11-3-11; 11-13-11; 11-14-11
				Ortalama Artış Yüzdesi	0,6431			

Bölüm 4.2’de yer alan tablolarda bulunan SEADÜMRP için oluşturulan çözümlerden bazıları örnek olarak verilmiştir. Türkiye veri setinde yer alan ‘n’ düğüm sayısı, ‘p’ açılacak ADÜ sayısı, ‘v’ ADÜ’lere atanan araç sayısı, ‘q’ kurulacak ADÜ linki sayısını belirttiği (TR.n.p.v.q) ve ‘ α ’ değerinin literatürde yer aldığı gibi 1; 0,8; 0,6; 0,4 ve 0,2 olduğu çözümler incelenmiştir.

Tablo 4.3'te yer alan TR.16.3.2.2 probleminin tüm $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8$ ve 1 değerlerine göre rotaları ve tasarım ağlarına ait çözümler Şekil-4.1'de yer almaktadır.



Şekil 4.1. TR.16.3.2.2 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde Model-4.1 Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

Bölüm 3.2'de de belirtildiği gibi ADÜ yerleri belirlenirken, her bir düğümün diğer düğümlere olan uzaklıkları toplanmıştır ve 'p' adet ADÜ için en düşük toplama ait 'p' sayıda ADÜ seçimi yapılmıştır. Bu seçime göre Şekil 4.1'de görüldüğü üzere TR.16.3.2.2 probleminde ADÜ'ler 1-Adana, 2-Ankara ve 11-Konya düğümlerinden oluşmaktadır.

Bu bölümde ilk olarak ' α ' ölçek ekonomisi değerlerinin ADÜ linklerini ve rotaların yapısını nasıl etkilediği incelenmek istenmiştir. Ayrıca, örnek için ADÜ linklerinin sıkı olduğu bir örnek üzerinde durulmuştur. Önceki bölümde belirtildiği gibi, bağlantı kurulacak ADÜ linki sayısı en az 'ADÜ sayısı-1' olmalıdır. Burada ele alınan örnekte, 3 ADÜ ve 2 ADÜ linkinin yerleşmesini sağlayan modelin çözülmesini oldukça zorlayan bir örnektir. Şekil 4.1'de ADÜ'ler arasında kurulan linkler incelendiğinde indirim katsayısı değeri $\alpha=0,2$ olduğunda ADÜ'ler arasında (1-2) ve (1-11); $\alpha=0,4$ ve $\alpha=0,6$ olduğunda ADÜ'ler arasında (1-2) ve (2-11); $\alpha=0,8$ ve $\alpha=1$ olduğunda ise (1,11) ve (2,11) linklerinin kurulduğu gözlenmektedir. Linkler arası uzaklıklar (1-2): 490 km, (1-11): 356 km ve (2,11): 258 km'dir. Haritalardan görülebileceği üzere ölçek ekonomisi değeri yükseldikçe, ADÜ linkleri birbirlerine yakın olacak şekilde kurulmuştur. Uzaklık değerleri dikkate alındığında, aralarında uzun mesafelerin olduğu ADÜ linkleri kurulduğunda ölçek ekonomilerinden büyük ölçüde avantaj elde edilir. Şekil 4.1(a)'da kurulan ADÜ linklerinin aralarındaki mesafe 846 km iken, Şekil 4.1 (e)'de kurulan ADÜ linklerinin arasındaki mesafe 614 km'dir. Aynı zamanda şekil 4.1 (e)'de yer alan ADÜ linkleri birbirlerine en kısa mesafeli oluşturulabilecek linklerdir. Linklerin değişmesiyle oluşturulan rotalarda da farklılıklar meydana gelmiştir. Tablo 4.3'te görüldüğü üzere amaç fonksiyonu değerleri indirim katsayısı değerleri düştükçe azalmıştır. 1-Adana, 2-Ankara ve 11-Konya ADÜ'lerinin $\alpha=0,8$ ve $\alpha=1$ olduğundaki rotaları diğer ' α ' değerlerinin oluşturduğu rotalardan çok farklıdır. Dolayısıyla problemin rotalarının birden değişmesi ' α ' değerinin problemin çözümünü zorlaştırması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ek olarak problemin çözüm süresinin ve problem çözümü için türetilen dal-sınır ağacı sayısının $\alpha=0,8$ ve $\alpha=1$ olduğundaki durumda diğer ' α ' değerlerinden daha iyi sonuçlar vermesinden de anlaşılabılır.

TR.16.3.2.2 $\alpha=0,2$ örneği için en büyük uzaklığa sahip rotaları; 1-Adana ADÜ'sünün collect_sum(1,1) değeri: 1.115 km; 2-Ankara ADÜ'sünün distribute_sum(2,1) değeri: 765 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 490 km'nin 0,2 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu elde edilen değer 1.978 km'dir.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=0,4$ olduğunda toplam uzaklık 2.011,2 km; 1-Adana ADÜ'sünün collect_sum(1,1) değeri 925 km, 11-Konya ADÜ'sünün distribute_sum(11,5) değeri 787 km, (1-2) ve (2-11) ADÜ linklerinin oluşturduğu

toplam mesafe (1-2) + (2-11)= 748 km'nin 0,4 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu bulunmuştur.

$\alpha=0,2$ olduğundaki şekiller için rotalar arasındaki farklılıklar incelendiğinde 11-Konya ADÜ'süne ait rotalarda değişim olmadığı gözlenmektedir. Aynı zamanda 6-Erzurum ve 14-Sivas düğümleri karşılıklı olarak atandıkları ADÜ'ler değiştirmiştir. 6-Erzurum düğümü $\alpha=0,2$ olduğunda 1-Adana ADÜ'süne, 14-Sivas düğümü ise 2-Ankara ADÜ'süne atanmıştır. $\alpha=0,4$ olduğunda ise 6-Erzurum düğümü 2-Ankara ADÜ'süne, 14-Sivas düğümü 1-Adana ADÜ'süne atanarak yeni rotalar oluşturmuşlardır.

İndirim katsayısı $\alpha=0,6$ olduğunda ise en büyük uzaklığa sahip rotaları 11-Konya ADÜ'sünün collect_sum(11,5) değeri 787 km, 1-Adana ADÜ'sünün distribute_sum(1,1) değeri 925 km ve (1-2) ve (2-11) ADÜ linklerinin oluşturduğu toplam mesafe (1-2) + (2-11)= 748 km'nin 0,6 indirim katsayısıyla çarpımı sonucu elde edilen değer 2.160,8'dir.

Rotalar incelendiğinde, $\alpha=0,6$ ve $\alpha=0,4$ olduğundaki şekillerde ADÜ ağ tasarımının aynı kaldığı ancak her ADÜ'nün araçlarının düğümleri ziyaret sıralamalarının ters olduğu görülmüştür.

$\alpha=0,8$ örneği için en büyük uzaklığa sahip rota, ADÜ linkleri kullanılmadan 11-Konya ADÜ'süne ait iki aracın oluşturduğu rotadan gelmiştir ve değeri 2.239 km'dir. Burada, bir ADÜ'ye ait farklı araç rotalarının yerleşiminin '*i-j*' düğümleri arasında maksimum uzaklığı sağlaması; rotalamanın ne kadar önemli olduğunun göstergesidir. Bu rotaların çok uzun oluşmasının sebebi ise 11-Konya ADÜ'sünün İç Anadolu Bölgesi'nde yer almasına rağmen bir rotasında kendinden çok uzakta Karadeniz ve Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Trabzon ve Erzurum gibi iki şehire; ek olarak da diğer rotasında Ege ve Akdeniz Bölge'sinde yer alan Antalya, İzmir ve Manisa gibi şehirlere hizmet vermesi gerekçe olarak gösterilebilir. Problem örneklerinde ADÜ yerlerinin merkezi olması tercih edildiğinden ve bu sebeple merkezde yerleşmiş olan ADÜ'lerin birbirine yakın olarak seçilmesine sebep olduğundan, ADÜ'ler arasındaki indirim katsayısı dahi, bir ADÜ'nün sadece kendi rotalarından maksimum toplama ve maksimum dağıtım değerlerinin oluşmasına engel olamamıştır. Ek olarak rotalar indirim katsayısı değeri $\alpha=0,8$ olduğunda $\alpha=0,6$ olduğundaki şekiller ile aralarında oldukça farklılıklar vardır. 14-Sivas düğümü $\alpha=0,6$ olduğunda 1-Adana ADÜ'süne atanmışken, $\alpha=0,8$ olduğunda 2-Ankara ADÜ'süne atanmıştır. Ek olarak 4-Bursa ve 9-İstanbul düğümleri düğümü $\alpha=0,6$ olduğunda 11-

Konya ADÜ'süne atanmışken, $\alpha=0,8$ olduğunda 2-Ankara ADÜ'süne atanmıştır. 11-Konya ADÜ'sü; indirim katsayısı değeri $\alpha=0,6$ iken 2-Ankara ADÜ'sünde yer alan 6-Erzurum ve 15-Trabzon düğümlerine hizmet sağlamıştır. Rotalardaki değişiklikler sebebiyle rotalara ait toplama ve dağıtım değerleri değişmiştir.

İndirim katsayısı değeri $\alpha=1$ en büyük uzaklığa sahip rotaları 11-Konya ADÜ'sünün $\text{collect_sum}(11,6)$ değeri 1.224 km, 1-Adana ADÜ'sünün $\text{distribute_sum}(1,1)$ değeri 703 km ve ADÜ'ler arasındaki mesafe 356 km'nin toplanması sonucu elde edilen değer 2.283 km'dir.

Eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında ise, tablodan görülebileceği gibi, en büyük artış yüzdesi TR16.3.2 $\alpha=0,6$ ve $q=2$ örneğinde %3.141 olarak görülmüştür. 3 ADÜ'ye ait örneklerin tümünde ise amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi ortalama %0,6431 olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, gerçek hayat problemlerinde olduğu gibi, her ADÜ çiftinin kendi arasında link kurulmasına gerek olmadan, eksik bağlantılı bir tasarımla tablodan izleneceği üzere, amaç fonksiyonlarında çoğu durumda artış olmadan iki düğüm arasındaki uzaklık en küçüklenebilmektedir. Bu modelden elde edilecek tasarım ağları, lojistik/kargo sektörü yöneticileri için önemli stratejik kararlar içermektedir.

Tablo 4.4'te TR.16 veri seti $p=3$, $q=3$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.4'te yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir. Ancak tabloda yer alan problemler için artış yüzdesi değerleri 0 olduğundan tabloda yer verilmemiştir.

Tablo 4.4. Model-4.1 TR.16 $p=3$, $v=1,2,3$ $q=3$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi değerleri 0'dır.

p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
3.1.	1	1, 2, 11	1-2; 1-11;	3.190	6,781	1.242	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2;
			2-11				11-3-10-12-4-9-11
	0,8		1-2; 1-11;	3.118,80	25,985	8.618	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2;
			2-11				11-9-4-12-10-3-11
	0,6		1-2; 1-11;	3.047,60	13,641	2.505	1-8-7-16-5-14-1; 2-13-15-6-2;
			2-11				11-3-10-12-4-9-11
	0,4		1-2; 1-11;	2.976,40	21,344	4.399	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 1
			2-11				1-9-4-12-10-3-11

	0,2		1-2; 1-11; 2-11	2.909,60	21,453	3.291	1-14-5-16-7-8-1; 2-6-15-13-2; 11-9-4-12-10-3-11
3.2.	1	1, 2, 11	1-2; 1-11; 2-11	2.283	417,797	61.224	1-5-16-1; 1-7-8-1; 2-9-4-2; 2-14-13-2; 11-6-15-11; 11-12-10-3-11
	0,8		1-2; 1-11; 2-11	2.193	826,203	152.289	1-7-16-5-1; 1-8-14-1; 2-6-2; 2-13-15-2; 11-3-10-12-11; 11-4-9-11
	0,6		1-2; 1-11; 2-11	2.095	243,453	37.426	1-7-16-5-1; 1-8-14-1; 2-6-2; 2-13-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
	0,4		1-2; 1-11; 2-11	2.001,20	224,766	33.960	1-7-16-5-1; 1-8-14-1; 2-6-2; 2-13-15-2; 11-3-12-10-11; 11-4-9-11
	0,2		1-2; 1-11; 2-11	1.978	733,953	44.612	1-6-1; 1-16-5-7-8-1; 2-14-13-2; 2-15-2; 11-9-4-11; 11-10-12-3-11
3.3.	1	1, 2, 11	1-2; 1-11; 2-11	1.888	533,641	24.151	1-5-1; 1-7-16-1; 1-14-1; 2-4-9-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-6-11; 11-15-11
	0,8		1-2; 1-11; 2-11	1.856	290,984	32.681	1-5-1; 1-14-1; 1-16-7-1; 2-9-4-2; 2-10-12-2; 2-13-2; 11-3-8-11; 11-6-11; 11-15-11
	0,6		1-2; 1-11; 2-11	1.840	220,75	29.950	1-6-1; 1-15-1; 1-16-5-7-1; 2-9-4-2; 2-12-10-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-8-11; 11-14-11
	0,4		1-2; 1-11; 2-11	1.742	210,532	25.928	1-6-1; 1-15-1; 1-16-5-7-1; 2-9-4-2; 2-10-12-2; 2-13-2; 11-3-11; 11-8-11; 11-14-11
	0,2		1-2; 1-11; 2-11	1.672	260,235	29.186	1-6-1; 1-7-8-1; 1-16-5-1; 2-3-2; 2-4-9-2; 2-15-2; 11-12-10-11; 11-13-11; 11-14-11

Eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında Tablo 4.4'te görüleceği gibi artış yüzdelere tamami 0 olmuştur. Bunun sebebi, her ADÜ'nün kendi arasında link kurularak ADÜ ağ tasarımının gevşek yapıda olmasına sebep olmaktadır. Tablo 4.5'te TR.16 veri seti $p=4$, $q=3$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.5'te yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir

Tablo 4.5. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=3$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=3								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
4.1.	1	1, 2, 11, 14	1-2; 2-11; 2-14	2.759	9,051	82,031	17.048	1-16-5-7-1; 2-12-10-4-9-2; 11-8-3-11; 14-6-15-13-14
	0,8		1-14; 2-11; 2-14	2.554,40	4,5	77,484	14.584	1-7-5-16-1; 2-9-4-12-10-2; 11-3-8-11; 14-13-15-6-14
	0,6		1-14; 2-11; 2-14	2.396,20	1,586	57,953	12.134	1-7-5-16-1; 2-9-4-12-10-2; 11-8-3-11; 14-13-15-6-14
	0,4		1-2; 1-14;	2.273,20	0	48,437	8.523	1-5-16-7-8-1; 2-9-4-2;

			11-14					11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,2		1-14; 2-14;	2.187,60	0	34,828	6.046	1-8-16-5-7-1; 2-9-4-2;
			11-14					11-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
4.2.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 2-11;	1.813	2,372	65,625	4.031	1-5-1; 1-7-16-1; 2-9-2; 2-13-2;
			11-14					11-3-8-11; 11-4-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 2-11;	1.707	0	62,907	5.317	1-5-1; 1-16-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			11-14					11-3-8-11; 11-4-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 2-11;	1.650,60	2,458	157,938	13.271	1-8-7-1; 1-16-5-1; 2-3-2; 2-13-2;
			11-14					11-4-9-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-14; 2-11;	1.516,20	0,344	162,344	12.950	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-15-6-14; 14-16-5-14
	0,2		1-14; 2-14;	1.411	0	76,593	6.949	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2;
			11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-15-14; 14-16-5-14
4.3.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 2-11;	1.691	13,872	32,078	1.708	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 2-11;	1.539,40	11,148	29,516	1.079	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 2-11;	1.387,80	7,782	30,985	2.580	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-11; 2-11;	1.236,20	1,628	26,11	2.161	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-11; 2-11;	1.131	0	24,344	1.671	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	2,9192			

Eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında, Tablo 4.5'ten görülebileceği gibi, en büyük artış yüzdesi TR.16.4.3 $\alpha=1$ ve $q=3$ örneğinde %13,872 olarak gerçekleşmektedir. 4 ADÜ'ye ait örneklerin tümünde artış yüzdesi ortalama %2,9192 olarak görülmektedir.

Tablo 4.6'da TR.16 veri seti $p=4$, $q=4$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. 4.6'da yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir.

Tablo 4.6. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=4$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=4								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
4.1.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 1-14;	2.530	0	30,25	4.254	1-7-5-16-8-1; 2-9-4-2;
			2-11; 11-14					11-12-10-3-11; 14-6-15-13-14
	0,8		1-11; 1-14;	2.444,40	0	28,281	5.267	1-8-7-5-16-1; 2-4-9-2;

			2-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-6-14
	0,6		1-11; 1-14;	2.358,80	0	27,937	4.417	1-7-5-16-8-1; 2-4-9-2;
			2-11; 11-14					11-12-10-3-11; 14-6-15-13-14
	0,4		1-11; 1-14;	2.273,20	0	27,828	4.894	1-8-7-16-5-1; 2-4-9-2;
			2-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-6-14
	0,2		1-11; 1-14;	2.187,60	0	34,656	8.207	1-8-5-16-7-1; 2-9-4-2;
			2-11; 11-14					11-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
4.2.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 1-14;	1.807	2,033	78,938	8.940	1-5-1; 1-7-16-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 11-14					11-4-12-10-11; 11-8-3-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 1-14;	1.707	0	142,797	10.328	1-5-1; 1-7-16-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 11-14					11-3-8-11; 11-4-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 1-14;	1.611	0	261,891	28.133	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-5-16-14; 14-6-15-14
	0,4		1-11; 1-14;	1.511	0	114,703	13.660	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-5-16-14; 14-6-15-14
	0,2		1-11; 1-14;	1.411	0	82,219	5.885	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-15-14; 14-16-5-14
4.3.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 1-14;	1.645	10,774	34,266	1.702	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 1-14;	1.493,40	7,827	26,312	1.455	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 2-11;	1.336,60	3,806	30,453	2.208	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-11; 1-14;	1.221,60	0,427	27,891	2.569	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,2		1-11; 2-11;	1.131	0	20,391	659	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	1,0066			

Tablo 4.6’da yer alan eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında, TR.16.4.3 $\alpha=1$ ve $q=4$ olduğunda en büyük artış yüzdesi değeri %10,774 olmaktadır. Tabloda yer alan amaç fonksiyonundaki artış yüzdelерinin ortalaması ise %1,0066 olarak gerçekleşmiştir. Her ADÜ’nün kendi arasında link kurulmasına gerek olmadan, eksik bağlantılı bir tasarımla, amaç fonksiyonlarının çoğu durumda artış olmadan iki düğüm arasındaki uzaklığın en küçüklendiği görülmektedir.

Tablo 4.7’de TR.16 veri seti $p=5$, $q=4$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.7’de yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3’te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir

Tablo 4.7. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=4$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=4								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5.1.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-14;	2.337	6,227	96,079	11.762	1-7-5-16-1; 2-4-9-2; 8-3-8;
			2-14; 11-14					11-12-10-11; 14-13-15-6-14
	0,8		1-14; 2-14;	2.169,40	2,874	65,157	8.792	1-16-5-7-1; 2-9-4-2; 8-3-8;
			8-14; 11-14					11-10-12-11; 14-6-15-13-14
	0,6		1-8; 1-11;	2.077,60	1,963	76,157	12.447	1-7-16-5-1; 2-4-9-2; 8-13-8;
			2-11; 11-14					11-3-12-10-11; 14-15-6-14
	0,4		1-11; 2-11;	1.939	0	33,703	3.833	1-7-16-5-1; 2-4-9-2; 8-13-8;
			8-11; 11-14					11-3-12-10-11; 14-15-6-14
	0,2		1-11; 2-11;	1.839	0	34	4.332	1-13-1; 2-9-4-2; 8-7-16-5-8;
			8-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-15-6-14
“5.2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-11; 2-11;	1.813	19,198	30,906	2.501	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-11; 11-14					11-10-11; 11-12-4-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 2-11;	1.641,80	15,538	30,89	1.680	1-5-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-11; 11-14					11-12-10-11; 11-13-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 2-11;	1.470,60	11,106	28,531	3.028	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-11; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-11; 2-11;	1.299,40	3,753	18,125	1.003	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-8; 1-11;	1.181,20	0	10,532	4	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			2-11; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	6,066			

Tablo 4.7’de yer alan eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında en büyük artış yüzdesi TR.16.5.2 $\alpha=1$ ve $q=4$ örneğinde %19,198 olarak görülmektedir. 5 ADÜ’ye ait örneklerde amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi ortalama %6,066’dır.

Tablo 4.8’de TR.16 veri seti $p=4$, $q=5$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.8’de yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3’te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir.

Tablo 4.8. Model-4.1 TR.16 $p=4$, $v=1,2,3$ $q=5$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=5								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
4.1.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 1-14; 2-11;	2.530	0	27,86	5.443	1-5-16-7-8-1; 2-9-4-2;
			2-14; 11-14					11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,8		1-2; 1-11; 1-14;	2.444,40	0	23,375	3.648	1-16-5-7-8-1; 2-4-9-2;
			2-11; 11-14					11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,6		1-2; 1-11; 1-14;	2.358,80	0	31,64	7.347	1-8-16-5-7-1; 2-4-9-2;
			2-14; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-6-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	2.273,20	0	33,031	6.727	1-5-16-7-8-1; 2-9-4-2;
			2-11; 11-14					11-12-10-3-11; 14-6-15-13-14
	0,2		1-2; 1-14; 2-11;	2.187,60	0	40,016	7.337	1-5-16-7-8-1; 2-4-9-2;
			2-14; 11-14					11-12-10-3-11; 14-6-15-13-14
4.2.	1	1, 2, 11, 14	1-2; 1-11; 1-14;	1.807	2,033	184,187	16.260	1-5-1; 1-16-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 11-14					11-4-12-10-11; 11-8-3-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 1-14; 2-11;	1.707	0	265,547	24.042	1-5-1; 1-7-16-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-14; 11-14					11-8-3-11; 11-10-12-4-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-14; 2-11;	1.611	0	86,094	7.834	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-15-14; 14-16-5-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	1.511	0	85,078	7.969	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-5-16-14; 14-6-15-14
	0,2		1-2; 1-14; 2-11;	1.411	0	73,859	6.336	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-15-14; 14-16-5-14
4.3.	1	1, 2, 11, 14	1-11; 1-14; 2-11;	1.531	3,098	33,641	3.601	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-11; 1-14; 2-11;	1.413,20	2,036	25,829	1.108	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-10-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-11; 1-14; 2-11;	1.324,20	2,842	37,844	5.216	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-10-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-4-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	1.216,40	0	26,265	2.800	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,2		1-2; 1-11; 2-11;	1.131	0	20,734	1.121	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-14; 11-14					11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	0,6673			

Tablo 4.8’de yer alan eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında, en büyük artış yüzdesi TR16.4.3 $\alpha=1$ ve $q=5$ örneğinde %3,098 olarak görülmüştür. 4 ADÜ’ye ait örneklerin tümünde ise amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi ortalama %0,6673 olmuştur.

Tablo 4.9’da TR.16 veri seti $p=5$, $q=5$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.9’da yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3’te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir.

Tablo 4.9. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=5$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=5								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5.1.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-11; 1-14;	2.217	0,773	59,89	9.878	1-6-1; 2-4-9-2; 8-7-16-5-8;
			2-11; 11-14					11-3-12-10-11; 14-13-15-14
	0,8		1-8; 1-11; 2-11;	2.108,80	0	79	11.831	1-6-1; 2-9-4-2; 8-5-16-7-8;
			8-14; 11-14					11-12-10-3-11; 14-15-13-14
	0,6		1-8; 1-11; 1-14;	2.037,60	0	61,375	8.392	1-6-1; 2-9-4-2; 8-7-16-5-8;
			2-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-14
	0,4		1-11; 1-14; 2-11;	1.939	0	41,281	5.698	1-7-5-16-1; 2-9-4-2; 8-13-8;
			8-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-15-6-14
	0,2		1-2; 1-8; 1-11;	1.839	0	49,969	5.195	1-7-5-16-1; 2-4-9-2; 8-13-8;
			8-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-15-6-14
5.2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-11; 1-14;	1.611	5,917	17,688	1.002	1-5-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			2-11; 11-14					11-9-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-8; 1-11; 2-11;	1.493,40	5,095	15,547	866	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-8; 1-11; 1-14;	1.351,80	2,131	11,156	16	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			2-11; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-8; 1-11; 2-11;	1.252,40	0	13,766	415	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			8-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-11; 2-8; 2-11;	1.181,20	0	10,953	21	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			8-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	1,3916			

Eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında, Tablo 4.9’dan görülebileceği üzere, en büyük artış yüzdesi TR16.5.2 $\alpha=1$ ve $q=5$ örneğinde %5,917 olarak görülmüştür. 5 ADÜ’ye ait örneklerin tümünde ise amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi ortalama %1,3916 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 4.10’da TR.16 veri seti $p=4$, $q=6$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.10’da yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3’te bulunan veriler

aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir. Ancak tabloda yer alan problemler için artış yüzdesi değerleri 0 olduğundan tabloda yer verilmemiştir.

Tablo 4.10. Model-4.1 TR.16 p=4, v=1,2,3 q=6, α =0,2;0,4;0,6;0,8;1 Veri Seti Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi değerleri 0'dır.

p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
4.1.	1	1, 2, 11, 14	1-2; 1-11; 1-14;	2.530	18,063	3.521	1-16-5-7-8-1; 2-9-4-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-12-10-3-11; 14-6-15-13-14
	0,8		1-2; 1-11; 1-14;	2.444,40	24,719	4.326	1-7-5-16-8-1; 2-4-9-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,6		1-2; 1-11; 1-14;	2.358,80	29,578	4.158	1-8-7-5-16-1; 2-4-9-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-3-12-10-11; 14-13-15-6-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	2.273,20	54,704	6.012	1-16-5-7-8-1; 2-9-4-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
	0,2		1-2; 1-11; 1-14;	2.187,60	29,297	5.307	1-7-16-5-8-1; 2-4-9-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-12-3-11; 14-6-15-13-14
4.2.	1	1, 2, 11, 14	1-2; 1-11; 1-14;	1.771	33,031	4.966	1-5-1; 1-7-16-1; 2-4-9-2; 2-10-12-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-3-8-11; 11-13-11-1; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-2; 1-11; 1-14;	1.707	77,625	8.594	1-5-1; 1-7-16-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-3-8-11; 11-4-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-11; 1-14;	1.611	62,531	7.020	1-3-1; 1-8-7-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-4-11; 11-10-12-11; 14-5-16-14; 14-6-15-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	1.511	56,391	6.148	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-4-11; 11-12-10-11; 14-15-6-14; 14-16-5-14
	0,2		1-2; 1-11; 1-14;	1.411	50,594	4.875	1-3-1; 1-7-8-1; 2-9-2; 2-13-2;
			2-11; 2-14; 11-14				11-4-11; 11-12-10-11; 14-5-16-14; 14-15-6-14
4.3.	1	1, 2, 11, 14	1-2; 1-11; 1-14;	1.485	20,281	875	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,8		1-2; 1-11; 1-14;	1.385	19,031	740	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-11; 1-14;	1.287,60	19,781	966	1-5-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-7-14; 14-15-14
	0,4		1-2; 1-11; 1-14;	1.216,40	23,704	1.620	1-5-1; 1-7-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-8-2; 2-9-2; 11-3-11;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-11; 11-12-11; 14-6-14; 14-13-14; 14-15-14
	0,2		1-2; 1-11; 1-14;	1.131	20,093	888	1-7-1; 1-8-1; 1-16-1; 2-4-2; 2-9-2; 2-13-2; 11-3-11;
			2-11; 2-14; 11-14				11-10-11; 11-12-11; 14-5-14; 14-6-14; 14-15-14

Tablo 4.10'da yer alan eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında amaç fonksiyonu artış yüzdesi değerlerinin tamamının 0 olduğu görülmektedir. Kurulan ADÜ linkleri sayısı

artıkça, gevşek bir ağ tasarımı ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple de amaç fonksiyonu artış yüzdelерinin azaldığı söylenebilmektedir.

ADÜ sayısı ve ADÜ linki değeri sabit tutulup araç sayısının amaç fonksiyonu değeri nasıl etkilendiğı incelendiğinde ' α ' indirim katsayısı değeri '1' olarak alındığında; örnek olarak Tablo 4.10'da bulunan TR.16.4.1.6 probleminin amaç fonksiyonu değeri 2.530 km, TR.16.4.2.6 olduğunda amaç fonksiyonu değeri 1.771 km ve TR.16.4.3.6 olduğundaki amaç fonksiyonu değeri 1.485 km olarak belirlenmiştir. Bölüm 3.2'de belirtildiğı gibi; diğer parametreler sabit tutulduğunda, araç sayısı ile modelin amaç fonksiyonu arasında ters orantı olduğu görölmektedir.

Tablo 4.11'de TR.16 veri seti $p=5$, $q=6$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.11'de yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir

Tablo 4.11. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=6$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

q=6								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5.1.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-11; 1-14;	2.200	0	29,141	5.455	1-6-1; 2-4-9-2; 8-7-5-16-8;
			2-11; 8-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-14
	0,8		1-8; 1-11; 1-14;	2.108,80	0	26,453	3.527	1-6-1; 2-9-4-2; 8-7-5-16-8;
			2-11; 8-11; 11-14					11-3-10-12-11; 14-13-15-14
	0,6		1-8; 1-11; 2-11;	2.037,60	0	59,859	6.925	1-6-1; 2-9-4-2; 8-5-16-7-8;
			8-11; 8-14; 11-14					11-12-10-3-11; 14-15-13-14
	0,4		1-2; 1-8; 1-11;	1.939	0	33,875	4.807	1-5-16-7-1; 2-4-9-2; 8-13-8;
			2-11; 8-14; 11-14					11-10-12-3-11; 14-6-15-14
	0,2		1-2; 1-8; 1-14;	1.839	0	28	4.018	1-7-16-5-1; 2-4-9-2; 8-13-8;
			2-11; 8-11; 11-14					11-3-12-10-11; 14-15-6-14
5.2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-11; 1-14;	1.602	5,325	20,609	1.997	1-3-1; 1-5-1; 2-4-2; 2-13-2; 8-7-8; 8-16-8;
			2-8; 2-14; 11-14					11-9-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-8; 1-11; 2-11;	1.488,40	4,743	15,094	1.026	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			2-14; 8-14; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-8; 1-11; 1	1.341,80	1,375	14,047	1.233	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			-14; 2-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-2; 1-8; 1-11;	1.252,40	0	15,797	797	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			2-11; 8-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-8; 1-11; 1-14;	1.181,20	0	9,735	26	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			2-8; 2-11; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14

				Ortalama Artış Yüzdesi	1,1443			
--	--	--	--	------------------------	--------	--	--	--

Eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında ise, Tablo 4.11’den görülebileceği gibi, en büyük artış yüzdesi TR16.5.2 $\alpha=1$ ve $q=6$ örneğinde %5,325 olarak görülmüştür. 5 ADÜ’ye ait örneklerin tümünde ise amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi ortalama %1,1443 olarak gerçekleşmiştir.

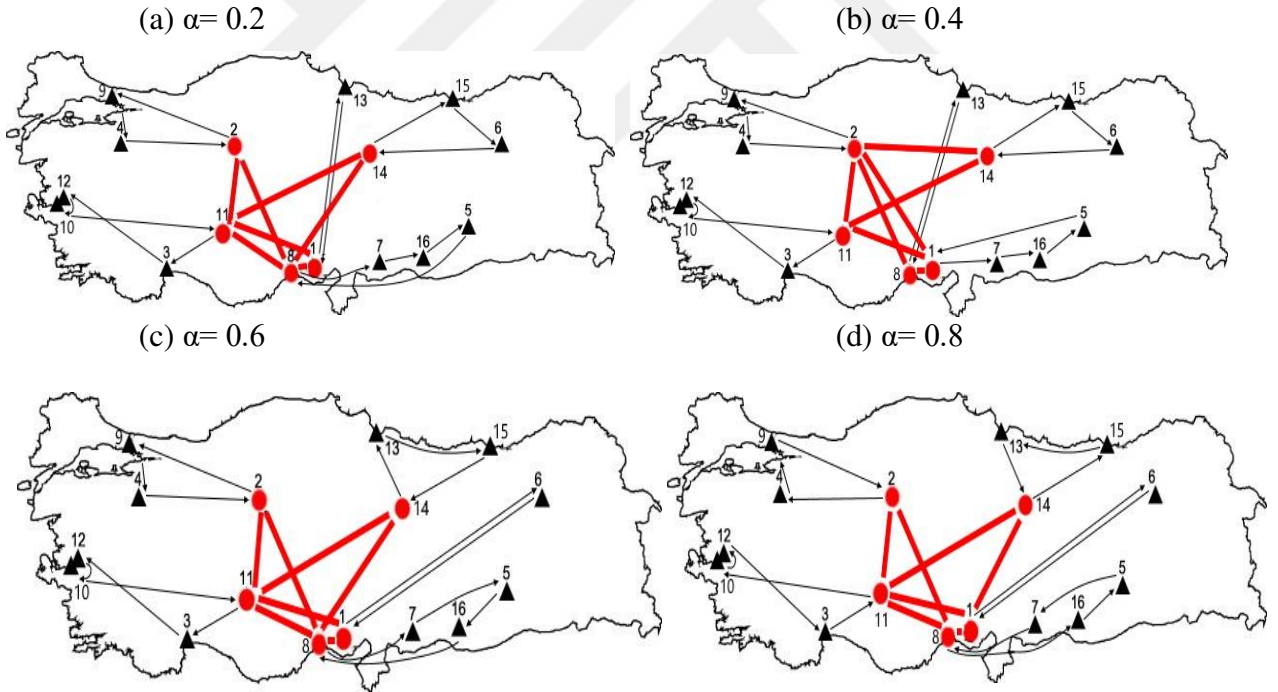
Tablo 4.12’de TR.16 veri seti $p=5$, $q=7$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.12’de yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3’te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir

Tablo 4.12. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=7$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları

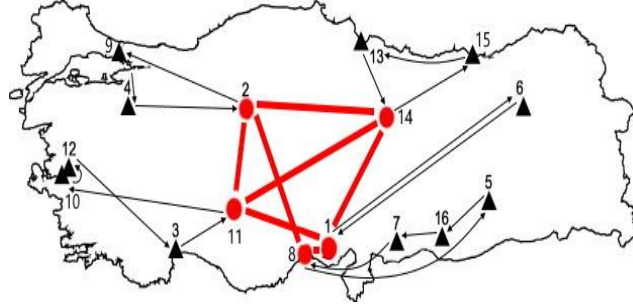
q=7								
p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Artış yüzdesi	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5.1.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-8; 1-11; 1-14; 2-8;	2.200	0	39,921	4.951	1-6-1; 2-9-4-2; 8-5-16-7-8;
			2-11; 2-14; 11-14					11-10-12-3-11; 14-15-13-14
	0,8		1-8; 1-11; 1-14; 2-8;	2.108,80	0	29,812	4.078	1-6-1; 2-4-9-2; 8-16-5-7-8;
			2-11; 8-11; 11-14					11-10-12-3-11; 14-15-13-14
	0,6		1-8; 1-11; 2-8; 2-11;	2.037,60	0	31,25	3.822	1-6-1; 2-9-4-2; 8-7-5-16-8;
			8-11; 8-14; 11-14					11-3-12-10-11; 14-13-15-14
	0,4		1-2; 1-8; 1-11; 2-8;	1.939	0	32,843	5.119	1-7-16-5-1; 2-9-4-2; 8-13-8;
			2-11; 2-14; 11-14					11-3-12-10-11; 14-15-6-14
	0,2		1-8; 1-11; 2-8; 2-11;	1.839	0	21,719	3.296	1-13-1; 2-9-4-2; 8-7-16-5-8;
			8-11; 8-14; 11-14					11-3-12-10-11; 14-15-6-14
5.2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-2; 1-8; 1-11; 1-14;	1.521	0	12,156	200	1-3-1; 1-5-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-7-8; 8-16-8;
			2-11; 2-14; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-8; 1-11; 1-14; 2-8;	1.421	0	13,937	399	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8;
			2-11; 2-14; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-8; 1-11; 1-14;	1.331	0,559	14,703	971	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			2-11; 2-14; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-8; 1-11; 1-14; 2-8;	1.252,40	0	13,25	712	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			2-11; 8-14; 11-14					11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-2; 1-8; 1-11; 1-14;	1.181,20	0	11,812	226	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8;
			2-11; 8-11; 11-14					11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
				Ortalama Artış Yüzdesi	0,059			

Tablo 4.12’de yer alan eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında tablodan görülebileceği gibi, artış yüzdesi değer alan tek çözüm TR16.5.2 $\alpha=0,6$ ve $q=7$ örneğinde %0,559 olarak görülmüştür. Dolayısıyla, gerçek hayat problemlerinde olduğu gibi, eksik bağlantılı bir tasarımla da amaç fonksiyonlarında çoğu durumda artış olmadan iki düğüm arasındaki uzaklık en küçüklenebilmektedir.

Tablo 4.12’de yer alan TR.16.5.1.7 probleminin tüm $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8$ ve 1 değerlerine göre rotaları ve tasarım ağlarına ait çözümler Şekil-4.2’de yer almaktadır. Bu problem örneğinin incelenmek istenmesinin nedeni, gevşek bir ADÜ tasarım ağındaki kararları görebilmektir. 5 ADÜ’ye sahip bir tasarım ağında, en az 4 link, en fazla 10 link kurulabilmektedir. Dolayısıyla ele alınan $q=7$ link sayısı, gevşek bir tasarım ağına işaret etmektedir.



(e) $\alpha = 1$



Şekil 4.2. TR.16.5.1.7 Örneği için $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Üzerinde *Model-4.1* Problem Sonuçlarının Şekilsel Gösterimi

TR.16.5.1.7 probleminde önerilen yöntemle göre belirlenen ADÜ yerleri Şekil 4.2’de görüldüğü üzere 1-Adana, 2-Ankara, 8-Mersin, 11-Konya ve 14-Sivas düğümleridir.

Şekil 4.2’de ADÜ’ler arasında kurulan linkler incelendiğinde indirim katsayısı değeri $\alpha=0,2$ olduğunda ADÜ’ler arasında kurulan linklerin uzaklığı $2.511 \cdot 0,2 = 502,2$ km; $\alpha=0,4$ olduğunda $2.598 \cdot 0,4 = 1.039,2$ km; $\alpha=0,6$ olduğunda $2.511 \cdot 0,6 = 1.506,6$ km; $\alpha=0,8$ olduğunda $2.442 \cdot 0,8 = 1.953,6$ km; $\alpha=1$ olduğunda ise 2.536 km olarak hesaplanmıştır. ADÜ’ler arasında kurulan linkler ve uzaklıkları incelendiğinde görülebileceği üzere indirim katsayısı $\alpha=0,2$ ve $\alpha=0,6$ olduğunda ADÜ tasarım ağı aynı şekilde oluşmuş ancak, indirim katsayılarından ötürü ADÜ linkleri arasındaki maliyetler birbirlerinden oldukça farklılaşmıştır. Ayrıca α değeri düştükçe, ADÜ linkleri arasındaki maliyet düşmekte, ve arttıkça da genel olarak bir artış göstermektedir. Bu örnekte, ADÜ linkleri arasındaki mesafenin indirim katsayısı olmadan önceki en yüksek halinin $\alpha=0,4$ iken oluştuğu gözlemlenmektedir. Burada ayrıca belirtilmek istenen, ADÜ tasarım ağı gevşek olduğu için, neredeyse tüm ADÜ çiftleri arasında karşılıklı akışlara izin verilen bir tasarımın oluşmasıyla, amaç fonksiyonu hesaplarında da bu durumun i-j düğümleri arasındaki en büyük uzaklığı hesaplarken dikkate alınıyor olmasıdır.

$\alpha=0,2$ olduğunda Şekil 4.2(a)’da yer alan ADÜ tasarım ağı incelendiğinde en büyük uzaklığa sahip rotalar; 11-Konya ADÜ’sü için $\text{collect_sum}(11,4)$ değeri 1.015 km, 14-Sivas ADÜ’sü için $\text{distribute_sum}(14,5)$ değeri 724 km ve aralarındaki uzaklık 500 km’nin 0,2 ile çarpılması sonucu 1839 km olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, $\alpha=0,2$ iken

oluşan linkler ve uzaklıkları, 1-Adana 8-Mersin: 69 km; 1-Adana 11-Konya: 356 km; 2-Ankara 8-Mersin: 483 km; 2-Ankara 11-Konya: 258 km; 8-Mersin 11-Konya: 348 km; 8-Mersin 14-Sivas: 497 km ve 11-Konya 14-Sivas: 500 km'dir. Oluşan linklerin toplam uzaklığı $2.511 \cdot 0,2 = 502,2$ km'dir.

TR.16.5.1.7 örneğinde $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ değerleri için ADÜ'ler arasında link kurulduğu için, eksik bağlantılı ADÜ tasarım açısından yararlanılmasına gerek kalmamış ve amaç fonksiyonunu iki ADÜ'nün birbirine olan uzaklığı oluşturmuştur.

Şekil 4.2(b), $\alpha=0,4$ olduğunda en büyük uzaklığa sahip rotalar incelendiğinde $\alpha=0,2$ olduğu durumdakiyle aynı maksimum toplama ve maksimum dağıtım değerleri olduğu görülüyor. 11-Konya ADÜ'sü $\text{collect_sum}(11,4)$ değeri 1.015 km ve 14-Sivas ADÜ'sü $\text{distribute_sum}(14,5)$ değeri 724 km ve aralarındaki uzaklık 500 km'nin 0,4 ile çarpılması sonucu 1.939 km olarak bulunmuştur. $\alpha=0,4$ iken oluşan linkler ve uzaklıkları, 1-Adana 2-Ankara: 490 km; 1-Adana 8-Mersin: 69 km; 1-Adana 11-Konya: 356 km; 2-Ankara 8-Mersin: 483 km; 2-Ankara 11-Konya: 258 km; 2-Ankara 14-Sivas: 442 km ve 11-Konya 14-Sivas: 500 km'dir. Oluşan linklerin toplam uzaklığı $2.598 \cdot 0,4 = 1.039,2$ km'dir.

$\alpha=0,4$ olduğunda $\alpha=0,2$ olduğundaki rotalar genel olarak aynı kalmış ancak 13-Samsun düğümü $\alpha=0,2$ olduğunda 1-Adana ADÜ'süne atanmışken $\alpha=0,4$ olduğunda 8-Mersin ADÜ'süne atanmıştır. Ancak bu durum maksimum toplama ve maksimum dağıtım değerlerini etkilememiştir.

Şekil 4.2(c), $\alpha=0,6$ olduğunda en büyük uzaklığa sahip rotalar incelendiğinde 11-Konya ADÜ'sü $\text{collect_sum}(11,4)$ değeri 1.015 km ve 1-Adana ADÜ'sü $\text{distribute_sum}(1,1)$ değeri 809 km ve aralarındaki uzaklık 356 km'nin 0,6 ile çarpılması sonucu 2.037,6 km olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, $\alpha=0,6$ iken oluşan linkler ve uzaklıkları, 1-Adana 8-Mersin: 69 km; 1-Adana 11-Konya: 356 km; 2-Ankara 8-Mersin: 483 km; 2-Ankara 11-Konya: 258 km; 8-Mersin 11-Konya: 348 km; 8-Mersin 14-Sivas: 497 km ve 11-Konya 14-Sivas: 500 km'dir. Oluşan linklerin toplam uzaklığı $2.511 \cdot 0,6 = 1.506,6$ km'dir.

$\alpha=0,6$ olduğunda $\alpha=0,4$ olduğundakinden farklı bir ADÜ ağ tasarımına sahiptir. α 'nın 0,4 olduğu durumda 13-Samsun düğümü Akdeniz Bölgesinde yer alan 8-Mersin ADÜ'süne atanmışken, $\alpha=0,6$ olduğunda görece kendisine daha yakın olan 14-Sivas ADÜ'süne atanmıştır. $\alpha=0,4$ olduğunda 6-Erzurum düğümü görece kendine yakın olan

14-Sivas ADÜ'süne atanmışken $\alpha=0,6$ olduğunda 1-Adana ADÜ'süne atanmıştır. Bu yüzden ki 1-Adana ADÜ'sü ve 6-Erzurum düğümü arasındaki uzaklık maksimum dağıtım değeridir. Ek olarak 5-Diyarbakır, 7-Gaziantep ve 16-Urfa illerinin oluşturduğu bir rota $\alpha=0,4$ iken 1-Adana ADÜ'süne atanmış ancak $\alpha=0,6$ olduğunda 8-Mersin ADÜ'süne atanmıştır.

İndirim katsayısı $\alpha=0,8$ olduğunda en büyük uzaklık değeri 2.108,8 km, 1-Adana ADÜ'sü collect_sum(1,1) değeri 809 km, 11-Konya ADÜ'sü distribute_sum(11,4) değeri 1.015 km ve aralarındaki uzaklık 356 km'nin 0,8 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. $\alpha=0,8$ olduğunda oluşan linkler ve uzaklıkları, 1-Adana 8-Mersin: 69 km; 1-Adana 11-Konya: 356 km; 1-Adana 14-Sivas: 428 km; 2-Ankara 8-Mersin: 483 km; 2-Ankara 11-Konya: 258 km; 8-Mersin 11-Konya: 348 km; ve 11-Konya 14-Sivas: 500 km'dir. Oluşan linklerin toplam uzaklığı $2.442 \cdot 0,8 = 1.953,6$ km'dir.

Şekil 4.2(d) ve Şekil 4.2(c)'deki rotalar incelendiğinde 1-Adana ADÜ'sünde oluşturulan rotada bir değişim olmadığı, 2-Ankara, 8-Mersin, 11-Konya ve 14-Sivas ADÜ'lerinin düğümleri ziyaret sıralarının değiştiği görülmektedir.

$\alpha=1$ olduğunda $\alpha=0,8$ olduğundaki ADÜ ağ tasarımı aynı kalmasına rağmen kurulan ADÜ linklerinin değiştiği görülmektedir. Bu değişimler sonucunda en büyük uzaklık rotaları, 14-Sivas ADÜ'sü collect_sum(14,5) değeri 685, 11-Konya ADÜ'sü distribute_sum(11,4) değeri 1.015 ve ADÜ'ler arası uzaklık değeri 500 km'nin toplanması sonucu elde edilen değer 2.200 km olarak elde edilmiştir. $\alpha=0,8$ olduğunda oluşan linkler ve uzaklıkları, 1-Adana 8-Mersin: 69 km; 1-Adana 11-Konya: 356 km; 1-Adana 14-Sivas: 428 km; 2-Ankara 8-Mersin: 483 km; 2-Ankara 11-Konya: 258 km; 2-Adana 14-Sivas: 442 km; ve 11-Konya 14-Sivas: 500 km'dir. Oluşan linklerin toplam uzaklığı 2.536 km'dir.

Özetle, ADÜ linkleri gevşek olarak tasarlandığında, ADÜ linkleri arasında bağlantıya izin verildiği için, amaç fonksiyonu hesabında, eksik bağlantılı tasarım ağı sebebiyle ek bir artış gözlenmemektedir.

Tablo 4.13'te TR.16 veri seti $p=5$, $q=8$ olduğunda yapılan deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.13'te yer alan sütunlardaki verilerle Tablo 4.3'te bulunan veriler aynı sırada ve özellikte yerleştirilmiştir. Ancak tabloda yer alan problemler için artış yüzdesi değerleri 0 olduğundan tabloda yer verilmemiştir.

Tablo 4.13. Model-4.1 TR.16 $p=5$, $v=1,2$ $q=8$, $\alpha=0,2;0,4;0,6;0,8;1$ Veri Seti Sayısal Sonuçları *Tablodaki tüm problemler için artış yüzdesi değerleri 0'dır.

p.v.	α	ADÜ Yerleri	ADÜ Linkleri	Amaç Fnk.	Çözüm Süresi (sn)	Dal Sınır Ağacı Sayısı	Rota
5.1.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-8; 2-11; 8-11; 11-14	2.200	38,86	4.147	1-6-1; 2-9-4-2; 8-16-5-7-8; 11-12-10-3-11; 14-15-13-14
	0,8		1-8; 1-11; 1-14; 2-8; 2-11; 8-11; 8-14; 11-14	2.108,80	33,796	5.231	1-6-1; 2-4-9-2; 8-5-16-7-8 11-10-12-3-11; 14-15-13-14
	0,6		1-2; 1-8; 1-11; 2-11; 2-14; 8-11; 8-14; 11-14	2.037,60	36,297	5.286	1-6-1; 2-9-4-2; 8-7-16-5-8; 11-3-12-10-11; 14-13-15-14
	0,4		1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-8; 2-11; 8-11; 11-14	1.939	43,75	5.025	1-7-5-16-1; 2-4-9-2; 8-13-8; 11-3-10-12-11; 14-15-6-14
	0,2		1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-8; 2-11; 8-11; 11-14	1.839	24,375	4.418	1-5-16-7-1; 2-4-9-2; 8-13-8; 11-10-12-3-11; 14-6-15-14
5.2.	1	1, 2, 8, 11, 14	1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-11; 2-14; 8-11; 11-14	1.521	9,89	25	1-3-1; 1-5-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-7-8; 8-16-8; 11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,8		1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-11; 2-14; 8-14; 11-14	1.421	10,891	8	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8; 11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,6		1-2; 1-8; 1-11; 1-14; 2-11; 2-14; 8-11; 11-14	1.323,60	10,484	47	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8; 11-4-11; 11-12-10-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,4		1-2; 1-8; 1-11; 2-8; 2-11; 8-11; 8-14; 11-14	1.252,40	11	21	1-5-1; 1-7-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-16-8; 11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14
	0,2		1-2; 1-8; 1-11; 2-8; 2-11; 8-11; 8-14; 11-14	1.181,20	11,594	5	1-5-1; 1-16-1; 2-9-2; 2-13-2; 8-3-8; 8-7-8; 11-4-11; 11-10-12-11; 14-6-14; 14-15-14

Tablo 4.13'te yer alan açılacak ADÜ sayısı 5, kurulacak bağlantı sayısı 8 olduğunda eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı olan problem SEADÜMRP çözümleri ile SADÜMRP çözüm sonuçları karşılaştırıldığında amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi değerlerinin 0 olduğu görülmektedir. Amaç fonksiyonu artış yüzdesi değerlerinin 0 olmasının sebebi ise kurulacak ADÜ bağlantı sayısının artması sonucu oluşan tasarım ağının daha gevşek bir yapıya sahip olmasıdır.

SEADÜMRP için oluşturulan çözümlerde ' $TR.n.p.v.q$ ve α ' şeklinde bir kısaltma kullanılacaktır.

Amaç fonksiyonu değerleri üzerinde açılacak ADÜ sayısının etkisi incelenmek istenmiştir. Kurulacak ADÜ linki sayısı 4 ve indirim katsayısı değeri $\alpha=1$ olduğunda, Tablo 4.6'da yer alan açılacak ADÜ sayısı 4 ve her ADÜ'ye atanan araç sayısı 1 olduğunda amaç fonksiyonu değeri 2.530 km iken, açılacak ADÜ sayısı 5'e yükseltildiğinde Tablo 4.7'de yer alan TR.16.5.1.4 problemi için amaç fonksiyonu değeri

2.337 km'ye düşmektedir. ADÜ sayısının artması bu bölümde yer alan diğer tablolarda da incelendiğinde, amaç fonksiyonunun azalmasına sebep olduğu görülmektedir.

ADÜ linklerinin amaç fonksiyonu değerlerini nasıl etkilediği incelenecek olduğunda Tablo 4.7'de bulunan TR.16.5.1.4 $\alpha=1$ probleminin amaç fonksiyonu değeri 2.337 km iken, ADÜ'ler arasında kurulacak link sayısı 5'e yükseltildiğinde Tablo 4.9'da yer alan TR.16.5.1.5 $\alpha=1$ probleminin amaç fonksiyonu değeri 2.217 km olmuştur. 'q' sayısı 6, 7 ve 8 değerlerini aldığı anda amaç fonksiyonu değeri 2.200 km olmuştur. ADÜ'ler arasında kurulacak link sayısını arttırdığımızda amaç fonksiyonu değeri önce azalmakta sonrasında ise tam bağı ADÜ tasarım ağına benzediğinden amaç fonksiyonu değeri sabit kalmaktadır. Dikkat edilmelidir ki 5 ADÜ'nün yer aldığı ADÜ tasarım ağına link sayısının 6 ya da 8 olması arasında amaç fonksiyonu değeri bakımından bir farklılık yoktur. ADÜ ağı tasarlanırken link sayısı kararının dikkatli verilmesi gereksiz link kurma maliyetlerin önüne geçebilecektir. Tablolarda yer alan örneklerin bir kısmında 'q' sayısı arttıkça amaç fonksiyonu değerinin önce azaldığı ve sonra sabit kaldığı, bazı örneklerde ise değer sabit kaldığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi model de yer alan ADÜ sayısı ve kurulacak ADÜ linki sayısı ile ilgili olan bu durum tam bağı ADÜ tasarım ağına benzemesiyle ilgilidir.

Bölüm 4.2'de yer alan tablolarda bulunan amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi değerleri incelendiğinde, kurulacak link sayısı azaldığında artış yüzdesi artmaktadır. İncelenen tablolarda yer alan en yüksek artış %19,198 ile TR.16.5.2.4 $\alpha=1$ problemidir. En yüksek artışın 5 ADÜ için kurulacak bağlantı sayısının 4 olması problemin zorlandığını göstermektedir. Bağlantı sayılarının artmasıyla ADÜ tasarım ağının tam bağı bir ağ yapısına benzemesi sebebiyle beklendiği gibi amaç fonksiyonundaki artış yüzdesi değeri 0'a düşmüştür. ' α ' değerleri 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 olduğunda sırasıyla amaç fonksiyonundaki artış yüzdeleri ortalaması %0; %0,238; %1,384; %2,038; %2,981'dir

Eksik ADÜ ağı kurmanın dezavantajı ise tam bağı bir ağ tasarımıyla arasındaki toplam uzaklık değerlerindeki farka katlanmaktır. Ancak tam bağı bir ADÜ ağına da oluşacak nakliye maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Karar vericilerin oluşacak maliyetleri planlamaları ve ona göre ADÜ ağılarını tasarlamaları gerekmektedir.

Özetle, zamana duyarlı ürün taşıyan firmaların ve günlük taşıma yapan kargo şirketlerinin yöneticileri/karar vericileri, ADÜ tasarım ağı oluştururken bu modelden

faaydalanabilecektir. Bunun yanı sıra ADÜ sayılarındaki artışın da en büyük uzaklık değeriini azaltması da yapılabilecek bir diğer yatırım olabilecektir. ADÜ'ler arasında kurulan link sayısı incelendiğinde arttırılan ADÜ linki sayısının da bir noktaya kadar en büyük rota uzunluğunu azalttığı sonrasında da sabit kaldığı görölmektedir. Modellerde, araç sayılarının artması, açılacak ADÜ sayılarının arttırılması ve kurulacak ADÜ linki sayılarını arttırması en büyük uzaklık değeriini azalttığından yatırımların bu doğrultuda yapılması fayda sağlayacaktır.

İzleyen bölümde sonuç ve öneriler kısmı sunulmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ilk olarak “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama Problemi” için literatürde ilk defa yer alan ve ADÜ yerlerinin önceden bilindiği varsayılan bir matematiksel model önerisinde bulunulmuş, 16 düğümlük Türkiye veri seti üzerinde problemin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Sonrasında, SADÜMRP modeline eksik bağlantılı ADÜ tasarım ağı kararları eklenerek ADÜ yerlerinin belirli olduğu varsayımıyla, literatürde ilk defa yer alan “Tek Atamalı Sabit Yerleşimli ADÜ Merkez Rotalama ve Eksik Bağlantılı Ağ Tasarımı Problemi” ve probleme ait karma tamsayılı bir matematiksel model oluşturulmuş ve aynı veri seti üzerinde testler yapılarak modelin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

ADÜ’lerin yerlerinin belirli olduğu durumlarda, araç rotalaması günlük verilebilecek operasyonel bir karardır. Maliyet açısından düşünüldüğünde uzun dönemde çok önemli bir yere sahiptir. Sayısal sonuçlar incelendiğinde, ADÜ yerleri aynı kalsa bile indirim katsayısı değerlerine, araç sayısına ve ADÜ sayısına bağlı olarak SADÜMRP’nde hem atamaların hem de rotaların değişebildiği ve bu değerlere göre amaç fonksiyonu değerlerinin oldukça etkilendiği görülmektedir. Bununla birlikte SEPADÜMRP’nde de araç sayısına, açılacak ADÜ sayısına ve kurulacak link sayılarına göre atamaların ve rotaların değiştiği ve bu değerlerin de amaç fonksiyonu değerlerini etkilediği gözlenmiştir.

Bu çalışma, belirtildiği gibi özellikle kargo firmaları yöneticileri tarafından karar verme aşamalarında kullanılabilecek önemli bulgulara sahiptir. Ancak bu tez çalışması boyunca sunulan modeller, büyük veri setlerinde makul sürelerde çözüm vermeyebilir. Bu amaçla daha büyük çaptaki problemlerin çözümü için daha sonra yapılacak çalışmalarda problem için metasezgisel algoritmaların geliştirilmesi uygun olabilir. Konu üzerinde yapılacak bir diğer çalışma ise, atamaların çoklu versiyonunun geliştirilmesi şeklinde yürütülebilir.

KAYNAKÇA

- Abdinnour-Helm, S. (1998). A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2-3), 489-499.
- Abdinnour-Helm, S. and Venkataramanan, M.A. (1998). Solution approaches to hub location problems. *Annals of Operations Research*, 78, 31-50.
- Alumur, S.A. (2009). Hub Location and Hub Network Design, PhD Thesis, *Bilkent University Institute of Engineering and Sciences*, 153 p. (unpublished).
- Alumur, S. and Kara, B.Y. (2008). Network Hub Location Problems: The State of the Art. *European Journal of Operational Research*, 190(1), 1-21.
- Alumur, S. and Kara, B.Y. (2009). A hub covering network design problem for cargo applications in Turkey. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 1349-1359.
- Alumur, S.A., Kara, B.Y. and Karasan, O.E. (2009). The design of single allocation incomplete hub networks. *Transportation Research Part B*, 43, 936-951.
- Alumur, S.A., Kara, B.Y. and Karasan, O.E. (2012). Multimodal hub location and hub network design. *Omega*, 40, 927-939.
- Aykin, T. (1990). On a Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities. *European Journal of Operational Research*, 46(3), 409-411.
- Aykin, T. (1994). Lagrangian-Relaxation Based Approaches to Capacitated Hub-and-Spoke Network Design Problem. *European Journal of Operational Research*, 79(3), 501-523.
- Aykin, T. (1995). The Hub Location and Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 83(1), 200-219.
- Bashiri, M., Mirzaei, M. and Randall, M. (2013). Modeling fuzzy capacitated p -hub center problem and a genetic algorithm solution. *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), 3513-3525.
- Beasley, J.E. (1990). OR-Library: distributing test problems by electronic mail. *Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1069-1072.

- Bruns, A., Klose, A. and Stahly, P. (2000). Restructuring of swiss parcel delivery services. *OR-Spektrum*, 22(2), 285–302.
- Bryan, D.L. and O'Kelly, M.E. (1999). Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review. *Journal of Regional Science*, 39(2), 275-295.
- Calik, H., Alumur, S.A., Kara, B.Y. and Karasan, O.E. (2009). A tabu-search based heuristic for the hub covering problem over incomplete hub networks. *Computers and Operations Research*, 36(12), 3088-3096.
- Camargo, R.S.D., Miranda, G.D. and Lokketangen, A. (2013). A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem. *Appl Math Model*, 37(1213), 7465–7480.
- Campbell, A.M., Lowe, T.J. and Zhang, L. (2007). The p -hub center allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 819-835.
- Campbell, J.F. (1994a). A survey of network hub location. *Studies in Locational*, 6, 31–49.
- Campbell, J.F. (1994b). Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*, 72, 387–405.
- Campbell, J.F. (1996). Hub Location and the P-Hub Median Problem. *Operations Research*, 44(6), 923-935.
- Campbell, J.F., Stiehr, G., Ernst, A.T. and Krishnamoorthy M. (2003). Solving hub arc location problems on a cluster of workstations. *Parallel Computing*, 29, 555–574.
- Campbell, J.F., Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (2005a). Hub arc location problems: Part I–Introduction and Results. *Management Science*, 51(10), 1540–1555.
- Campbell, J.F., Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (2005b). Hub arc location problems: Part II–formulations and optimal algorithms. *Management Science*, 51(10), 1556–1571.
- Cetiner, S., Sepil, C. and Sural, H. (2010). Hubbing and routing in postal delivery systems. *Ann Oper Res*, 181(1), 109–124.

- Chen, J.F. (2007). A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Omega-International Journal of Management Science*, 35(2), 211-220.
- Contreras, I., Diaz, J.A. and Fernandez, E. (2009). Lagrangean relaxation for the capacitated hub location problem with single assignment. *Or Spectrum*, 31(3), 483-505.
- Correia, I., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2010). Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels. *Transportation Research Part B-Methodological*, 44(8-9), 1047-1066.
- Costa, M.D., Captivo, M.E. and Climaco, J. (2008) Capacitated single allocation hub location problem - A bi-criteria approach. *Computers & Operations Research*, 35(11), 3671-3695.
- Ebery, J. (2001). Solving Large Single Allocation P-Hub Problems with Two or Three Hubs. *European Journal of Operational Research*, 128(2), 447-458.
- Ernst, A.T., Hamacher, H., Jiang, H.Y., Krishnamoorthy, M. and Woeginger, G. (2009). Uncapacitated single and multiple allocation p -hub center problems. *Computers and Operations Research*, 36(7), 2230-2241.
- Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p -hub median problem. *Location Science*, 4(3), 139-154.
- Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (1998). An exact solution approach based on shortest-paths for p -hub median problems. *INFORMS Journal on Computing*, 10(2), 149-162.
- Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (1999). Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of Operations Research*, 86, 141-159.
- Ernst, A.T., Jiang, H. and Krishnamoorthy, M. (2005). Reformulations and computational results for uncapacitated single and multiple allocation hub covering problems. *CSIRO Mathematical and Information Sciences, Australia*. (unpublished).

- Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B. and Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 64(4), 1096-1109.
- Hakimi, S. (1964). Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12, 450-459.
- Hakimi, S. (1965). Optimum location of switching centers in a communications network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13, 462-475.
- Hamacher, H.W. and Meyer, T. (2006). Hub cover and hub center problems. *Department of Mathematics, University of Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Strasse, 67663 Kaiserslautern, Germany. Working paper.*
- Hwang, Y.H. and Lee, Y.H. (2012) Uncapacitated single allocation p -hub maximal covering problem. *Computers and Industrial Engineering*, 63(2), 382-389.
- Kara, B.Y. (1999). Modeling and analysis of issues in hub location problems. Ph.D. Thesis, *Bilkent University Industrial Engineering Department*, 06800 Bilkent, Ankara, Turkey. (unpublished).
- Kara, B.Y. and Tansel, B.C. (2000) On the single-assignment p -hub center problem. *European Journal of Operational Research*, 125 (3), 648-655.
- Kara, B.Y. and Tansel, B.C. (2001). The latest arrival hub location problem. *Management Science*, 47(10), 1408-1420.
- Kara, B.Y. and Tansel, B.C. (2003). The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations. *Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 59-64.
- Karimi, H. and Bashiri, M. (2011) Hub covering location problems with different coverage types. *Scientia Iranica*, 18(6), 1571-1578.
- Karimi, H. and Setak, M. (2014). Proprietor and customer costs in the incomplete hub location-routing network topology. *Appl Math Model*, 38(3), 1011–1023.
- Kartal, Z. and Ernst, A.T. (2015). Integer programming formulations for the uncapacitated vehicle routing p -hub center problem. *21st International*

Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation ,Society of Australia and New Zealand, Gold Coast, pp 1724–1730.

- Kartal, Z., Hasgul, S. and Ernst, A.T. (2017). Single allocation p -hub median location and routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Transp Res Part E Logist Transp Rev*, 108, 141–159.
- Kartal, Z., Krishnamoorthy, M. and Ernst, A.T. (2019). Heuristic algorithms for the single allocation p -hub center problem with routing considerations. *OR Spectrum*, 41, 99-145.
- Klincewicz, J.G. (1991). Heuristics for the P-Hub Location Problem. *European Journal of Operational Research*, 53(1), 25-37.
- Klincewicz, J.G. (1998). Hub location in backbone/tributary network design: A review. *Location Science*, 6(4), 307–335.
- Labbe, M., Yaman, H. and Gourdin, E. (2005). A branch and cut algorithm for hub location problems with single assignment. *Mathematical Programming*, 102(2), 371-405.
- Meyer, T., Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. (2009). A 2-phase algorithm for solving the single allocation p -hub center problem. *Computers and Operations Research*, 36(12), 3143-3151.
- Miller, C., Tucker, A. and Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7, 326-329.
- Mohammadi, M., Jolai, F. and Rostami, H. (2011). An M/M/c queue model for hub covering location problem. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(11-12), 2623-2638.
- Mokhtar, H., Perwira Redi, A.A.N., Krishnamoorthy, M. and Ernst, A.T. (2017). An intermodel hub location problem for container distribution in Indonesia. *Computers and Operations Research*, 104, 415-432.
- Nagy, G. and Salhi, S. (1998). The many-to-many location-routing problem. *Top*, 6(2), 261–275.

- Nickel, S., Schöbel, A. and Sonneborn, T. (2001). Hub location problems in urban traffic networks. *Mathematics Methods and Optimization in Transportation Systems*. Springer, 1–12 .
- O’Kelly, M.E. (1986a). The Location of Interacting Hub Facilities. *Transportation science*, 20(2), 92-106.
- O’Kelly, M.E. (1986b). Activity Levels at Hub Facilities in Interacting Networks. *Geographical Analysis*, 18(4), 343-356.
- O’Kelly, M.E. (1987). A Quadratic Integer-Program for the Location of Interacting Hub Facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), 393-404.
- O’Kelly, M.E. (1992). Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 71(3), 293-306.
- O’Kelly, M.E. (1998). Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B-Methodological*, 32(8), 605-616.
- O’Kelly, M.E. and Miller, H.J. (1994). The hub network design problem: A review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 2(1), 31–40.
- Özger, A. ve Oktal, H. (2009). Havayolu Kargo Taşımacılığında Kapasite Sınırı Olmayan Çok Atamalı p -Ana Dağıtım Üssü Medyan Problemine Tamsayılı Model Yaklaşımı. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(1), 47-60.
- Podnar, H., Skorin-Kapov, J. and Skorin-Kapov, D. (2002). Network cost minimization using threshold-based discounting. *European Journal of Operational Research*, 137, 371–386.
- Rieck, J., Ehrenberg, C. and Zimmermann, J. (2014). Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 863–878.
- Serper, E.Z. and Alumur, S.A. (2016). The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B*, 86, 51-65.
- Silva, M.R. and Cunha, C.B. (2009). New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Computers & Operations Research*, 36(12), 3152-3165.

- Tan, P.Z. and Kara, B.Y. (2007). A hub covering model for cargo delivery systems. *Networks*, 49(1), 28-39.
- Toh, R.S., and Higgins, R.G., 1985, The Impact of Hub and Spoke Network Centralization and Route Monopoly on Domestic Airline Profitability. *Transportation Journal*, 24, 16-27.
- Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M. and Yimaz, G. (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computers & Operations Research*, 32(4), 967-984.
- Wagner, B. (2008). Model formulations for hub covering problems. *Journal of the Operational Research Society*, 59(7) , 932-938.
- Wagner, B. N. (2004). A note on "the latest arrival hub location problem". *Management Science*, 50(12), 1751-1752.
- Wasner, M. and Zapfel, G. (2004). An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service. *Int J Prod Econ*, 90(3), 403–419.
- Yaman, H. (2009). The Hierarchical Hub Median Problem with Single Assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(6), 643-658.
- Yaman, H. and Elloumi, S. (2012). Star p -hub center problem and star p -hub median problem with bounded path lengths. *Computers and Operations Research*, 39(11), 2725-2732.
- Yaman, H., Kara, B.Y. and Tansel, B.C. (2007). The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers. *Transportation Research Part B-Methodological*, 41(8), 906-919.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000 0003 2898 5027

Dilek Uçar, 1994 yılı Nevşehir doğumlu olup T.C. vatandaşıdır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünden 2016 yılında lisans mezunu olmuştur. 2017 yılında Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

