

**ÇOK DÖNEMLİ PLANLAMA ÇEVRENİNDE MODÜLER
KAPASİTELİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE ANA
DAĞITIM ÜSSÜ AĞI TASARIMI PROBLEMLERİ**

YUSUF SEÇERDİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU
Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Tahir HANALIOĐLU
Anabilim Dalı Başkanı

YUSUF SEÇERDİN tarafından hazırlanan ÇOK DÖNEMLİ PLANLAMA ÇEVRENİNDE MODÜLER KAPASİTELİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE ANA DAĞITIM ÜSSÜ AĞI TASARIMI PROBLEMLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yusuf SEÇERDİN

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

Yusuf SEÇERDİN

ÇOK DÖNEMLİ PLANLAMA ÇEVRENİNDE MODÜLER KAPASİTELİ ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİMİ VE ANA DAĞITIM ÜSSÜ AĞI TASARIMI PROBLEMLERİ

ÖZET

Bu çalışmada, çok dönemli planlama çevreninde modüler kapasiteli ana dağıtım üssü (ADÜ) yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemleri ele alınmaktadır. Problemde, her dönemde, ADÜ'lerin yerleri ve kapasiteleri belirlenmekte, ADÜ ağı tasarımı, atama ve akış gönderme kararları verilmektedir. Tek ve çok atamalı iki durum için karışık tamsayılı doğrusal programlama modelleri geliştirilmiştir. Ayrıca, modeller için çeşitli geçerli eşitsizlikler önerilmektedir. Modellerin amaç fonksiyonunda, ADÜ kurmanın sabit maliyeti, ADÜ bağlantısı işletme maliyeti, kapasite modülü kurma maliyeti, ADÜ'lerdeki operasyonel maliyet ve ulaşım maliyetinden oluşan toplam maliyet enküçüklenmektedir. Her dönemde yeni bir ADÜ kurulabilmekte ve mevcut bir ADÜ'nün kapasitesi arttırılabilmektedir. ADÜ kapasitelerinin modüler olduğu ve her dönemde her ADÜ'ye en fazla bir kapasite modülü kurulabileceği varsayılmaktadır. Modeller, CAB veri kümesindeki 15 ve 25 düğümlü, 5 dönemli problemler üzerinde test edilmektedir. Bunun yanı sıra, önerilen geçerli eşitsizliklerin performansları incelenmektedir. Çok dönemli planlama yaklaşımının avantajı, zayıf değer ve güçlü değer şeklinde önerilen iki değer kavramı aracılığıyla ölçülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kapasiteli ADÜ yer seçimi, çok dönemli, ADÜ ağı tasarımı.

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

Yusuf SEÇERDİN

**MULTI-PERIOD HUB LOCATION AND HUB NETWORK
DESIGN PROBLEMS WITH MODULAR HUB CAPACITIES**

ABSTRACT

In this study, multi-period hub location and hub network design problems with modular hub capacities are considered. This problem decides on the locations and the capacities of hubs, the design of the hub network, the allocation of demand nodes to hubs and the routes of flow in each period. Mixed-integer linear programming formulations are developed for both the single and the multiple allocation versions of the problems. Furthermore, several sets of valid inequalities are proposed for enhancing the models. The objective of the models is to minimize total costs which consist of flow routing cost, hub operating cost, hub and hub link establishment costs, and capacity establishment cost. It is possible to establish a new hub and expand the capacity of an existing hub in each period during the planning horizon. It is assumed that capacities of the hubs are modular and at most one capacity module can be established for each hub in each period. Models are solved on test problems with 5-periods that are generated from the CAB data set with 15 and 25 nodes. In addition, computational performance of the proposed valid inequalities are analyzed. The value of the multi-period approach is determined using the proposed weak and strong value of the multi-period solution.

Keywords: Capacitated hub location, multi-period planning, hub network design.

TEŞEKKÜR

Tezimi okuyarak değerlendiren ve tavsiyelerde bulunarak katkı sağlayan değerli hocalarım Doç.Dr. Bülent TAVLI ve Yrd.Doç.Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN'a,

Tez çalışmasına başladığımız ilk günden beri desteğini hiç esirgemeyen, yurtiçinde ve yurtdışında düzenlenen konferanslara katılma isteğime destek olan, koordinasyon kurulunda yer aldığı EWGLA grubunun üniversitemizde organize edilen 20. oturumunun hazırlık ve düzenleme aşamasında görev vererek bana bir konferansı yakından gözlemleme fırsatı veren, toplantılar sırasındaki önemsiz olumsuzlukları unutturacak şekilde ofisinden her zaman gülümseyerek uğurlayan tez danışmanım ve değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Sibel ALUMUR ALEV'e,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, maddi ve manevi destek olan, dersler kapsamındaki projeler için takım arkadaşlarımla geç saatlere kadar gerçekleştirmek zorunda kaldığımız çalışmalarımı “Yine mi proje!” diye karşılayan, üç yıl boyunca evde neden olduğum dağınıklığı ufak sitemler dışında anlayışla karşılayan ANNEME ve ailemin diğer fertlerine,

Ve dersler, konferanslar, seminerler gibi akademik etkinliklerin yanı sıra sosyal açıdan da öğrenimimiz boyunca güzel vakit geçirdiğimiz arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İçindekiler

1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR TARAMASI	5
3 PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL	16
3.1 Problem Tanımı	16
3.2 Problem Parametreleri	19
3.3 Tek Atamalı Problem için Matematiksel Model	21
3.4 Çok Atamalı Problem için Matematiksel Model	25
3.5 Geçerli Eşitsizlikler	30
4 DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR	33
5 ÇOK DÖNEMLİ PLANLAMANIN AVANTAJI	50
6 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	56
KAYNAKLAR	59

Şekil Listesi

1.1	Hizmet verilen ağ çeşitleri.	2
2.1	Akış çeşitleri.	6
2.2	Atama kuralları.	7
4.1	CAB veri kümesi.	33
4.2	Tek atamalı problem sonuçları.	47
4.3	Çok atamalı problem sonuçları.	48

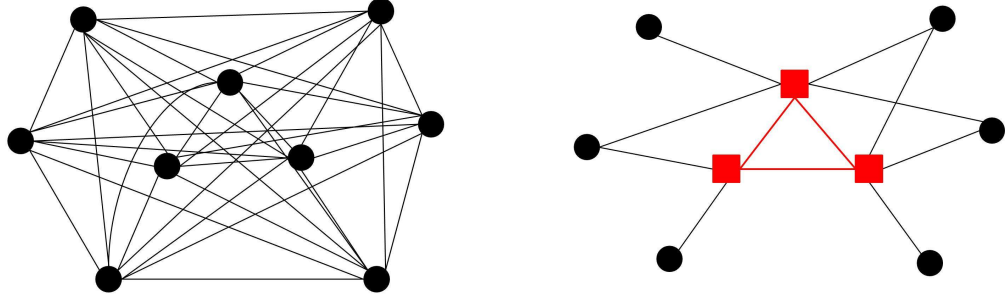
Tablo Listesi

2.1	Çok dönemli ADÜ yer seçimi çalışmalarının karşılaştırılması.	15
4.1	CAB veri kümesindeki düğümler ve temsil ettikleri şehirler.	34
4.2	CAB veri kümesi ve ilgili parametre değerleri.	34
4.3	Geçerli eşitsizlikler ile çözüm sürelerinin karşılaştırması.	37
4.4	Tek atamalı problemde geçerli eşitsizliklerin etkileri.	40
4.5	Çok atamalı problemde geçerli eşitsizliklerin etkileri.	41
4.6	Tek atamalı problem sonuçları.	43
4.7	Çok atamalı problem sonuçları.	43
4.8	25 düğümlü problemlerdeki kapasite kararları.	46
5.1	Çok dönemli planlamanın avantajı.	53

1. GİRİŞ

Küreselleşme ile birlikte ülkeler ve kıtalar arası ticaretin artması yük ve yolcu taşımacılığına olan ihtiyacın da artmasına neden olmuştur. Taşımacılığa olan ihtiyacın artmasıyla taşımacılık giderleri de artmış, bu durum taşımacılık faaliyetlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesini gerekli kılmıştır. Literatürde ana dağıtım üssü (ADÜ) olarak adlandırılan tesis ya da yapıların kullanılması sayesinde taşımacılık faaliyetleri daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Buldukları ağda bir ara durak noktası işlevi gören ADÜ'ler, aynı zamanda gelen akışı birleştirme, sıralama ve ayrıştırma gibi fonksiyonlara sahiptir. ADÜ'ler sayesinde farklı talep noktalarından gelen ve birleştirilen akış büyük miktarlar halinde taşınmakta ve ölçek ekonomisinden yararlanılmaktadır. Böylece, ağdaki tüm talep noktaları arasında doğrudan bağlantı kullanmak yerine (Şekil 1.1(a)), ADÜ'lerden yararlanılmasıyla daha az bağlantı kullanılarak talep karşılanabilmektedir (Şekil 1.1(b)). Daha az bağlantı kurulması ve akışın ADÜ'ler arasında büyük miktarlar halinde taşınması sonucunda ortaya çıkan ölçek ekonomisi karar vericiye maliyet avantajı sağlamaktadır .

Kurulacak ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi problemine literatürde *ADÜ yer seçimi problemi* adı verilmektedir. Bu problemde, ADÜ'lerin yer seçimi kararları dışında karar vericinin alması gereken iki önemli karar daha bulunmaktadır. Bunlardan ilki, ağda ADÜ olmayan düğümlerin, diğer deyişle talep noktalarının, hizmet alacakları ADÜ'lerin belirlenmesidir. Literatürde, atama kararları olarak adlandırılan bu karar sonucunda tüm talep noktaları en az bir ADÜ'ye atamı ve herhangi bir talep noktasına gelen ve giden akış bu ADÜ'ler aracılığıyla gönderilir. Problemde verilmesi gereken diğer önemli bir karar ise yerleri belirlenen



(a) Doğrudan bağlantılarla hizmet verilen ağ.

(b) ADÜ'ler ile hizmet verilen ağ.

Şekil 1.1: Hizmet verilen ağ çeşitleri.

ADÜ'ler kullanılarak ağdaki tüm akışın başlangıç ve bitiş noktaları arasında ulaştırılmasıdır.

ADÜ'lerden hem taşımacılık hem de telekomünikasyon ağlarında yararlanılmaktadır. Taşımacılık sektöründe ADÜ'ler, hava, deniz ve karayolu yük/yolcu taşımacılığı, posta dağıtımı ve şehir içi toplu taşıma ağlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yük ve kargo taşımacılığında transfer merkezleri, yolcu taşımacılığında merkezi istasyonlar ve aktarma merkezleri ADÜ görevi görmektedir. Bu noktalarda yolcular (veya yükler) nispeten daha büyük araçlara aktarılmakta yani birleştirilmekte ve/veya ayrıştırılmakta dolayısı ile bu noktalar ADÜ görevi görmektedir. Taşımacılık ağlarındaki kara ve demir yolları ilgili ADÜ bağlantılarını oluşturmaktadır.

Telekomünikasyon ağları veri, ses ve görüntü iletimi için kullanılan bilgisayar, telefon ve internet ağlarını içermektedir. Anahtar (switch), yoğunlaştırıcı (concentrator), geçit (gate), yönlendirici (router) ve çoklayıcı (multiplexor) gibi elektronik cihazlar telekomünikasyon ağlarında kullanılan ADÜ'lere örnek olarak verilebilir. Bu cihazlar, taşımacılık ağında olduğu gibi ağdaki iletişim noktaları arasında akan verinin birleştirilmesi, toplu halde taşınması ve ayrıştırılması için kullanılmaktadır. Veri iletimine ilişkin talep, telefon şebekeleri, fiber-optik ağlar gibi fiziksel bağlantılar veya uydu ve mikrodalgalar ağları gibi kablosuz bağlantılar aracılığıyla karşılanmaktadır [9, 12, 22].

Taşımacılık ve telekomünikasyon ağlarında karşılaşılan ADÜ yer seçimi problemleri benzerlik gösterse de sektörler arasında önemli farklılıklar da bulunmaktadır.

Bu farklılıklardan en önemlisi ağ üzerinde taşınan nesnedir. Taşımacılıkta fiziksel bir ulaştırma (yük veya yolcu) yapılırken, telekomünikasyon ağlarında soyut bir ulaştırma yapılmaktadır. Bu nedenle, ulaşım maliyetleri birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca, taşıma yapılırken, ağlar üzerindeki birleştirme ve ayrıştırma fonksiyonları ile ulaştırma açısından farklı prosedürler uygulanmaktadır. Bu durum, ADÜ yer seçimi probleminin uygulanacağı sektöre göre, farklı kısıtlarla farklı şekilde modellenmesini gerektirmektedir. Ulaşım yapılan nesnenin ve maliyetin farklı olması çözülecek problemlerin amaçlarını da değiştirmektedir. Taşımacılık sektöründe ulaşım maliyeti veya süresi önemli iken, telekomünikasyon sektöründe ağın kurulması için gereken sabit maliyet, ağda yaşanabilecek olası gecikme ve yoğunluklar karar vericinin daha çok önem verdiği ölçütlerdir [12]. Bu tez çalışması kapsamında taşımacılık sektöründeki problemler ele alınmaktadır.

ADÜ yer seçimi problemleri, gerçek hayatta genellikle stratejik karar verme süreci kapsamında ele alınmaktadır. Bu nedenle, üretim planlama, araç rotalama gibi daha çok günlük veya haftalık şekilde, yani kısa vadede, ele alınan problemlerden farklı olarak sonuçlarından daha uzun bir süre boyunca yararlanılması beklenmektedir. Bir bölgede ADÜ kurulacak noktalara karar verilmesi, birçok örnekte ADÜ'lerin inşa edilmesi, bu tesislerin gerekli ekipman ve personelle donatılarak işler hale getirilmesi, karar verici için maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle, ADÜ yer seçimi probleminin sonuçlarının karar verici tarafından uzun vadede değiştirilmeden kullanılması beklenmektedir. Fakat sonuçların değiştirilmeden kullanıldığı bu uzun süre zarfında problem parametrelerini oluşturan talep ve maliyet gibi verilerde değişiklikler yaşanması kaçınılmazdır. Bu değişiklikler sonucunda sadece planlama çevreni başındaki verilerle elde edilen sonuçların maliyet enküçüklenmesi veya kar enbüyüklenmesi gibi amaçlar için planlama çevreni sonunda optimal olmaması olasıdır. Bu nedenle, bu tezde ADÜ yer seçimi kararları içeren problemlerin, tek dönemli planlama yaklaşımı yerine verilerde beklenen olası değişiklikleri göz önünde bulunduran çok dönemli planlama yaklaşımı ile incelenmesi önerilmektedir.

Taşımacılık sektöründe, şehrin yeni imara açılan ya da kentsel dönüşüm projeleriyle nüfusu artan bölgelerine genişletilmesi istenilen toplu taşıma ağları veya yeni bir pazara açılma hedefi olan bir firmanın lojistik ağı için yapılacak planlama

bu tezde çalışılan çok dönemli ADÜ yer seçimi problemine verilebilecek en iyi örneklerdir.

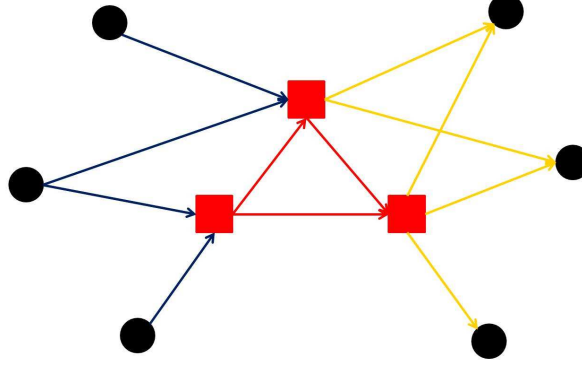
Bu tez çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde literatür taraması yer almaktadır. ADÜ yer seçimi literatürünün genel hatlarıyla özetlendiği bu bölümde, ayrıca çok dönemli ADÜ yer seçimi çalışmaları da incelenmektedir. Üçüncü bölümde, bu çalışmada ele alınan problem tanımlanmakta ve bu problem için geliştirilen matematiksel modeller sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, geliştirilen modellerin tasarlanan test problemleri üzerinde analiz edildiği deneysel çalışma ve sonuçları anlatılmaktadır. Çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi için önerilen planlama yönteminin avantajı beşinci bölümde incelenmektedir. Son olarak altıncı bölümde, bu tez çalışması için genel bir değerlendirme yapılmakta ve gelecekte yapılabilecek olası çalışmalardan bahsedilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

ADÜ yer seçimi problemleri, yolcu, yük veya veri akışı talep eden noktaların arasındaki talebin ADÜ'ler üzerinden gönderilebilmeleri için ADÜ kurulacak olan noktaların belirlenmesi ile ilgilenmektedir. ADÜ'lerin yerleri belirlendikten sonra ADÜ olmayan noktaların (talep düğümleri) hizmet alacakları ADÜ'lere atanması ve tasarlanan bu ağ üzerinde (ADÜ'ler arasında), talep edilen akışın tamamının başlangıç noktalarından bitiş noktalarına gönderilmesini ele almaktadır. Bunu gerçekleştirirken de, talep düğümleri arasındaki mesafe, süre vs. gibi başlangıçta bilinen bir veri ile hesaplanacak toplam maliyeti enküçüklemeyi amaçlamaktadır.

Bir ADÜ yer seçimi probleminin çözülmesiyle tasarlanan ağ iki bölümden oluşmaktadır. ADÜ'ler ve ADÜ'ler arasındaki ADÜ bağlantılarından oluşan ağa *ADÜ (alt) ağı*, ADÜ'ler ile talep düğümlerinin arasındaki bağlantıları içeren ağa ise *atama alt ağı* adı verilmektedir. Bir ADÜ yer seçimi probleminin sonucunda tasarlanan ağ üzerinde gönderilen akışın rotası üç bölüm halinde incelenmektedir. Akışın başladığı talep düğümünden, o talep düğümünün atandığı ADÜ'ye birleştirme işlemi için gönderilen ve Şekil 2.1'de mavi renkle gösterilen akışa *birleştirme akışı* adı verilmektedir. Rotası üzerinde uğradığı son ADÜ'den bitiş noktası olan talep düğümüne gönderilen ve Şekil 2.1'de sarı renkle temsil edilen akış *dağıtım akışı*dır. ADÜ'ler arasında ADÜ bağlantıları üzerinde gönderilen ve ölçek ekonomisine tabi olan akış ise *transfer akışı* olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.1'de kırmızı renkle betimlenmektedir).

ADÜ yer seçimi literatüründe, sıklıkla kullanılan üç temel varsayım bulunmaktadır. Birinci varsayıma göre, ADÜ ağının tam serim bir ağ olması, yani ağda kurulan her ADÜ çifti arasında bir ADÜ bağlantısının da kurulmuş



Şekil 2.1: Akış çeşitleri.

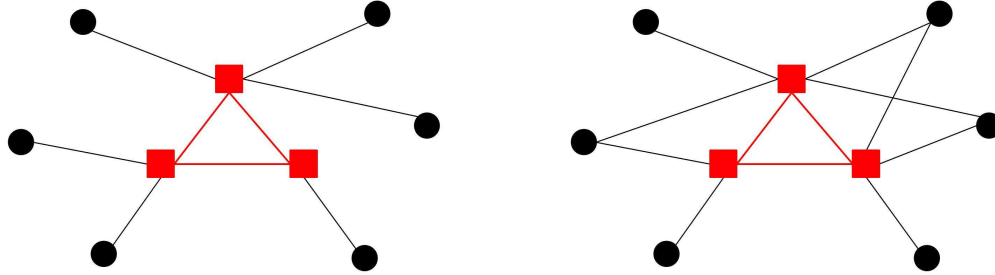
olması gerekmektedir. İkinci varsayım ADÜ'lerin ağa kazandıracığı avantajlar ile ilgilidir. ADÜ ağında, ADÜ bağlantıları üzerinde taşınan akış için ölçek ekonomisinden yararlanılmalıdır. Son varsayım da, atama alt ağında, iki talep düğümü arasında ADÜ'ye uğramayan doğrudan bir bağlantının bulunmamasıdır. Talep düğümleri en az bir ADÜ'ye uğrayan rotalar üzerinden birbirlerine akış gönderebilirler. Literatürdeki ADÜ yer seçimi problemlerinde, aksi belirtilmedikçe bu üç varsayımın da sağlandığı kabul edilmektedir.

İlk olarak yaklaşık yirmi beş yıl önce O'Kelly [32] ile çalışılmaya başlanan ADÜ yer seçimi problemleri çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan özellikler arasında probleme ait çözüm kümesinin biçimi, talep düğümlerinin ADÜ'lere atanması kuralı, kurulacak ADÜ sayısı, ADÜ'lerle ilgili kapasite kısıtları ve problemin amaç fonksiyonu bulunmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda ADÜ yer seçimi problemi ayrık veya sürekli çözüm kümesi üzerinde ele alınabilmektedir. Ayrık ADÜ yer seçimi problemlerinde, ADÜ'lerin seçilebileceği önceden belirlenmiş ayrık bir küme bulunmaktadır. Sürekli ADÜ yer seçimi probleminde ise ADÜ'ler düzlemdeki herhangi bir noktaya kurulabilmektedir.

ADÜ yer seçimi problemleri, talep düğümlerinin hizmet alacakları ADÜ'lere atanma esasına göre tek atamalı ve çok atamalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Tek atamalı ADÜ yer seçimi probleminde her talep düğümü yalnızca tek bir ADÜ'ye atanmakta, bu düğümde başlayan ve biten akışın tamamı, düğümün atandığı ADÜ üzerinden gönderilmektedir (Şekil 2.2(a)). Çok atamalı ADÜ yer seçimi probleminde ise, bir talep düğümüne birden fazla ADÜ hizmet verebilmektedir (Şekil 2.2(b)).



(a) Tek atama kuralı.

(b) Çok atama kuralı.

Şekil 2.2: Atama kuralları.

ADÜ yer seçimi problemlerinde kurulacak olan ADÜ sayısı önceden belirlenmiş olabilir. Önceden belirlenen bir sayıda ADÜ kurulan problemlere literatürde p -ADÜ yer seçimi problemleri adı verilmektedir. Bu problemlerde, açılması istenen ADÜ sayısının (p), karar verici tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Bunların dışında, kurulacak ADÜ sayısının doğrudan matematiksel model tarafından karar verildiği problemler de bulunmaktadır. Bu problemlerde kurulacak ADÜ sayısı çözümün bir parçasıdır.

ADÜ yer seçimi problemleri, ADÜ'lerin kapasiteli veya kapasitesiz olma durumlarına göre de ikiye ayrılmaktadır. Ele alınan problemlerde ADÜ'lerle ilgili herhangi bir kapasite kısıtı bulunmayabileceği gibi ADÜ'lere uğrayan ve/veya işlem gören toplam akış için bir kapasite sınırı bulunabilir.

Ele alınan varsayımlar ve uygulama alanlarına göre literatürde farklı ADÜ yer seçimi problemleri üzerine farklı çalışmalar bulunmaktadır. Sıklıkla çalışılan ADÜ yer seçimi problemleri arasında, p -ADÜ ortanca problemi, sabit maliyetli ADÜ yer seçimi problemi, p -ADÜ merkez problemi, ADÜ kaplama problemi, ADÜ ayırıt yer seçimi problemi ve ADÜ ağı tasarımı ADÜ yer seçimi problemi bulunmaktadır.

p-ADÜ ortanca probleminde verilen n adet talep noktasından p tanesi ADÜ olarak belirlenir ve tanımlanan atama kuralına göre talep noktaları belirlenen ADÜ'lere atanır. *p-ADÜ ortanca probleminde* amaç toplam ulaşım maliyetini enküçükmektir. Bu problem için ilk matematiksel model O'Kelly [32] tarafından önerilmiştir. Önerilen modelde amaç fonksiyonu karesel bir yapıya sahiptir ve doğrusal değildir. *p-ADÜ ortanca problemi* için sunulan ilk doğrusal tamsayılı model Campbell [8] tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada hem tek atamalı hem de çok atamalı *p-ADÜ ortanca problemleri* için $O(n^4)$ mertebesinde karar değişkeni ve kısıtlara sahip matematiksel modeller önerilmiştir. Skorin-Kapov vd. [33], Campbell [8] tarafından önerilen matematiksel modellerin doğrusal gevşetmelerinin çoğunlukla kesirli sonuçlar vermesi nedeniyle, doğrusal gevşetmesi daha sıkı olan yeni modeller önermiştir. Bu modellerdeki karar değişkeni ve kısıt sayıları da $O(n^4)$ mertebesinde. CPLEX ile optimal sonuçların bulunduğu bu çalışma ADÜ yer seçimi problemleri için ilk optimal çözüme girişi olarak kabul edilmektedir. Tek atamalı *p-ADÜ ortanca problemi* için çözüm süresi açısından en etkin matematiksel model Ernst ve Krishnamoorthy [20] tarafından önerilmektedir. Çok atamalı *p-ADÜ ortanca problemi* için ise en etkin formülasyon Boland vd. [6] tarafından önerilmektedir. Bu tez çalışmasında ele alınan problem için önerilen matematiksel modeller, Ernst ve Krishnamoorthy [20] ve Boland vd. [6] tarafından önerilen ve literatürdeki etkin formülasyonlar olduğu bilinen modeller temel alınarak geliştirilmiştir.

Açılacak ADÜ sayısının da karar verme sürecine dâhil edildiği *sabit maliyetli ADÜ yer seçimi probleminde* amaç toplam ulaşım ve ADÜ açma maliyetlerini enküçükmektir. Sabit maliyetli ADÜ yer seçimi problemi için ilk doğrusal matematiksel modeller Campbell [8] tarafından önerilmektedir. Bu problemler literatürde hem tek atamalı hem çok atamalı olarak hem de kapasiteli ve kapasitesiz olarak ayrı ayrı incelenmektedir. Sabit maliyetli kapasiteli ADÜ yer seçimi problemleri için ilk modeller yine Campbell [8] tarafından önerilmektedir. Aykin [4] ve Ernst ve Krishnamoorthy [21] kapasiteli problemin tek atamalı biçimini ele alan diğer çalışmalardır. Correia vd. [17], Ernst ve Krishnamoorthy [21]'nin önerdiği formülasyonun alternatif optimum çözümler olduğu durumlarda olumsuz sonuçlar verdiğini fark ederek gerekli kısıtları modellemiştir. Başka bir çalışmada, Correia

vd. [16] ADÜ kapasitelerinin matematiksel model tarafından belirlendiği tek atamalı sabit maliyetli ADÜ yer seçimi problemini ele almıştır. Bu problemde, ADÜ'lere kurulabilecek kapasitelerin farklı seviyede olduğu ve her bir ADÜ'ye yalnızca bir kapasite seviyesinin kurulabildiği varsayılmıştır. Correia vd. [18] ise bu problemde ADÜ'lere atanan talep düğümleri için alt ve üst sınırların bulunduğu durumu incelemiştir.

Ebery vd. [19] ile Boland vd. [6] sabit maliyetli kapasiteli ADÜ yer seçimi probleminin çok atamalı biçimini Campbell [8]'dan sonra ele alan diğer çalışmalardır. Marín [26] aynı problemin, iki talep düğümü arasında talep edilen akışın farklı rotalara bölünebildiği durumunu incelemiştir. Marín vd. [27] ise sabit maliyetli çok atamalı kapasitesiz ADÜ yer seçimi probleminde mesafe/maliyet matrisinin üçgen eşitsizliğini sağlamayan durumu için geçerli bir matematiksel formülasyon geliştirmiştir.

Farklı bir problem olan p -ADÜ merkez probleminde ise, toplam maliyet yerine en uzun sürede veya en yüksek maliyetle hizmet verilen iki talep noktası arasındaki servis süresinin veya maliyetin enküçüklenmesine odaklanılmaktadır. ADÜ kaplama ve p -ADÜ merkez problemleri ilk defa Campbell [8] tarafından önerilerek literatüre girmiş ADÜ yer seçimi problemleridir.

Herhangi iki talep noktasına önceden belirlenen bir servis seviyesinde (süre, maliyet) hizmet verilmesini sağlayan ADÜ kaplama probleminde toplam ulaşım maliyetleri ile birlikte ADÜ'lerin açılmasından kaynaklanan toplam maliyet de enküçüklenmektedir.

Literatürdeki temel varsayımlardan, ADÜ ağının tam serim olması varsayımının gevşetilmesiyle ortaya çıkan problemler ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemleridir. Bu problemlerde, ADÜ ağında açılacak veya işletilecek olan ADÜ bağlantılarına da karar verilmektedir. Bu problemler ilk olarak O'Kelly ve Miller [31] tarafından çalışılmıştır. Nickel vd. [30], Gelareh ve Nickel [24] ile Yoon ve Current [36] çok atamalı ADÜ ağı tasarımı kapasitesiz ADÜ yer seçimi problemini ele almaktadır. p -ADÜ ortanca, sabit maliyetli ADÜ yer seçimi, p -ADÜ merkez ve p -ADÜ kaplama problemlerinin tek atamalı biçimini ADÜ ağı tasarımıyla birlikte inceleyen ve ilk defa modelleyen çalışma Alumur

vd. [2]'dir. ADÜ ağı tasarımı kararları, yukarıda tanımlanmış diğer problemlere eklenerek literatüre çok farklı ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemleri tanımlanmıştır [10, 11, 14, 35].

Yukarıda genel hatlarıyla tanımlanan tüm ADÜ yer seçimi problemlerinin bazı özel durumları istisna olmak üzere NP-Zor olarak sınıflandırıldığı bilinmektedir [1]. Farklı ADÜ yer seçimi problemleri için literatürde önerilen matematiksel modeller, geliştirilen kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri, problemler kapsamında ele alınan farklı varsayımlar gibi detaylı bilgilere, Campbell vd. [9], Alumur ve Kara [1] ve Farahani vd. [22] yayın taraması makalelerinden ulaşılabilir. Ayrıca ADÜ yer seçimi literatürünün geçmiş yirmibeş yılını ele alan, bu alanın ortaya çıkmasındaki motivasyonu, ADÜ yer seçimi alanının geleceğini ve eksikliklerini tartışan Campbell ve O'Kelly [12] çalışması da okuyucular için yol gösterici bir kaynak olabilir.

Literatürde ADÜ yer seçimi problemleri ele alınırken sıklıkla kullanılan üç önemli veri kümesi bulunmaktadır. Literatürün en eski veri kümesi olan ve kısaca CAB olarak adlandırılan veri kümesi, ilk kez O'Kelly [32] tarafından kullanılmıştır. ABD'deki 25 şehir arasında 1970 yılında Sivil Havacılık Kurulu (Civil Aeronatics Board) tarafından oluşturulan, havayolu yolcu taşımacılığı verilerine dayanmaktadır. CAB'den sonra en fazla kullanılan ikinci veri kümesi Sidney'deki 200 bölgenin 1993 yılındaki Avustralya Posta Servisi verilerini içeren AP veri kümesidir. Bu veri kümesi Ernst ve Krishnamoorthy [20] tarafından literatüre kazandırılmıştır. Son veri kümesi ise Tan ve Kara [34] tarafından literatüre kazandırılan Türkiye veri kümesidir. Bu veri kümesinde kargo sektörüne ilişkin Türkiye'nin 81 ilindeki veriler bulunmaktadır. Bu üç veri kümesi arasında düğüm sayıları haricinde başka farklılıklar da bulunmaktadır. AP ve TR veri kümelerinde düğümler arasındaki akışlar simetrik değilken, CAB veri kümesindeki akışlar simetriktir. İçerdikleri maliyet parametreleri açısından da veri kümeleri birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Üç veri kümesine de OR Kütüphanesi [5]'nden ulaşılabilir.

Önceki bölümde de bahsedildiği gibi, ADÜ yer seçimi problemleri stratejik karar

verme sürecinde ele alınmakta ve sonuçlarından uzun bir süre boyunca yararlanılması düşünülmektedir. ADÜ yer seçimi probleminin sonuçlarının geçerli olduğu uzun süre boyunca verilerde meydana gelebilecek değişikliklerin de göz önünde bulundurulabilmesi için, bu tezde problemin çok dönemli bir şekilde modellenmesi önerilmektedir. Bu noktadan hareketle, literatür taraması bölümünün kalan kısmında problemi çok dönemli bir şekilde ele alan çalışmalara odaklanılmaktadır.

Literatürde çok dönemli ADÜ yer seçimi problemini ele alan yalnızca üç çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar Campbell [7], Gelareh [23] ve Contreras vd. [13]'dir.

Çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi ilk kez Campbell [7] çalışmasında ele alınmıştır. Çalışmada, talebin yoğunluğunun arttığı sabit bir bölgede hizmet veren bir nakliyecisi için, terminal ekleme ve mevcut terminalleri yeniden yerleştirme kararlarının ele alındığı sürekli bir yer seçimi modeli geliştirilmiştir. Modelde, ulaşım, terminal ekleme ve yeniden yerleştirme maliyetlerinin toplamı enküçülenmektedir. Ele alınan problem, çalışmanın yayınlandığı dönemde *dinamik tesis yer seçimi problemi* şeklinde adlandırılmasına rağmen, yer seçimi yapılan tesisler olan terminaller gönderilerin depolandığı ve birleştirildiği noktalar olduğu için aslında ADÜ'ler ile aynı fonksiyonlara sahiptir. Bu nedenle, Campbell [7] çok dönemli ADÜ yer seçimi literatürünün ilk çalışması olarak kabul edilmektedir. Problemden çok atamalı durum ele alınmaktadır.

Gönderilerin başlangıç ve bitiş noktalarının servis alanı üzerinde rassal şekilde belirlendiği bu problemde, geleceğe yönelik talep öngörüsü yapılmamakta anlık (current) talep kullanılmaktadır. Buna karşın, talebin servis alanındaki tüm noktalar için sabit fakat zamanla değişen bir oranda arttığı kabul edilmektedir. Çalışmada, talep öngörüsü yapılmadığı için mevcut talep verisi ve terminal yerlerine dayanan üç kısa vadeli (myopic) strateji geliştirilmiş ve test edilmiştir. Çalışmada, kısa vadeli stratejilerin performansı ve yeniden yer seçimi yapmanın önemi incelenmiş; terminal ekleme kararları için kısa vadeli stratejilerin optima yakın sonuçlar elde edemeyeceği sorusuna odaklanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, yeniden yer seçimi maliyeti, sabit terminal maliyetinin %25'inden fazla olduğu durumda, yeniden yer seçimi kararı almayan kısa vadeli bir stratejinin, yeniden yer seçimi yapılan diğer bir stratejiye tercih edileceği belirtilmiştir.

Literatürdeki çok dönemli ikinci çalışma olan Gelareh [23], toplu taşıma ağlarında ADÜ yer seçimi problemlerini konu alan bir doktora tezidir. Tezin bir bölümünde çok dönemli, çok atamalı, kapasitesiz ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemi ele alınmıştır. Bu çok dönemli problemde dört önemli varsayım bulunmaktadır. Birinci varsayıma göre, karar vericinin üzerinde çalıştığı planlama çevrenin başında hali hazırda işletilmekte olan bir sistem bulunmaktadır. İkinci varsayım ADÜ'ler ve ADÜ bağlantıları ile ilgilidir. Buna göre, bir ADÜ ve ADÜ bağlantısının durumu planlama çevreni boyunca en fazla bir kez değiştirilebilir. Yani, planlama çevreni içinde işletilmeye başlanan bir ADÜ veya ADÜ bağlantısı planlama çevreni sonuna kadar kapatılmamakta ve planlama çevreni içinde kapatılan bir ADÜ veya ADÜ bağlantısı tekrar işletilmeye başlatılmamaktadır. Üçüncü ve dördüncü varsayıma göre, bir ADÜ veya ADÜ bağlantısını herhangi bir dönemde işletebilmek için bakım ve onarım maliyetine katlanmak gerekmektedir. Ayrıca bir ADÜ ve ADÜ bağlantısını kaldırmak için de kapatma maliyeti söz konusudur. ADÜ'ler için çalışanların yeniden eğitilmesi veya işten çıkarılması, toplu taşıma ağında hızlı hatları temsil eden ADÜ bağlantıları için hızlı tren gibi belirli araç tiplerinin ve diğer sistemlerin boşa çıkması gibi nedenlerle tesis veya bağlantının işletilmesine son verilmesinin bir maliyete neden olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada temel modellere ek olarak mevcut kaynakların sınırlı olması düşünülerek iki ilave yaklaşım daha geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi, sırasıyla her dönemde kurulabilecek toplam ADÜ ve ADÜ bağlantısı sayısının birer parametreyle sınırlandırılmasıdır. İkincisi ise, kurulacak tesis sayılarını doğrudan sınırlandırmak yerine her dönemde tüm aktiviteler için kullanılacak bir bütçe belirlenmesi ve kullanılmayan bütçeden faiz geliri kazanılmasının sağlanmasıyla problemin bir ekonomi problemi olarak modellenmesidir. Kurulacak tesis sayısı için bir sınırlama bulunmadığında, tesislerin kullanımından elde edilecek faydanın, tesise ilişkin bakım ve onarım maliyetlerine baskın olacağı, bu nedenle de bir çok ADÜ'nün planlama çevreni içinde daha erken dönemlerde kurulabileceği yorumu yapılmıştır. Talebin nispeten daha monoton ve homojen bir şekilde arttığı problemlerin bu eğilime daha duyarlı olacağı belirtilmiştir.

Geliştirilen modeller CPLEX 9.1 ticari yazılımı ile çözdürülmüştür. Rassal

şekilde üretilmiş başlangıç sistemleri üzerinde yapılan deneyler sırasında ticari çözücünün 10 düğüm ve 3 dönemden daha büyük problemlere bir haftadan daha kısa sürede içerisinde çözüm bulamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle modellerle birlikte değişken azaltma tekniği kullanılarak çözücünün 15 düğümlü, 3 dönemli durumları yarım gün içerisinde ele alabilmesi sağlanmıştır. Matematiksel modellerin ticari çözücü ile küçük problemlerde bile uzun sürelere ihtiyaç duyması nedeniyle bir yerel arama sezgisel algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin ve yerel arama sezgiselinin performansını ölçebilmek için yapılan deneylerde 10, 15, 20 ve 40 düğümlü, 3, 6 ve 9 dönemden oluşan planlama çevrenine sahip 144 problem analiz edilmiştir. Matematiksel model ile en fazla 20 düğümlü ve 3 dönemli problemler için optimal çözümler bulunabilmektedir. Optimal çözümü bilinen 84 problemde elde edilen ortalamalara göre yerel arama sezgiseli en kötü durumda 33 saniyede optimal çözüme %2,06 uzaklıkta bir çözüme ulaşabilmektedir. Ayrıca, yerel arama sezgiseli en büyük problem olan 40 düğümlü 9 dönemli problem için 2 saat civarında iyi bir çözüm bulabilmektedir.

Çok dönemli ADÜ yer seçimi problemini konu alan bir diğer çalışma Conteras vd. [13]'dir. Çalışmada, çok dönemli, çok atamalı, kapasitesiz ADÜ yer seçimi problemi ele alınmıştır. Probleme, ADÜ kurma, kaldırma, işletme ve ulaşım maliyetlerinin toplamı enküçüklenmektedir. ADÜ'lerin ne zaman ve nerede açılacağı ile ne zaman kapanacağı kararları verilmektedir. Tüm planlama çevreni için talep hakkında öngörü yapıldığı varsayılmıştır. Problem için daha önce Hamacher vd. [25] tarafından önerilen ve sıkı bir formülasyon olan rota bazlı formülasyon kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Kullanılan rota bazlı formülasyonun çok dönemli probleme uyarlanması sırasında, karesel (doğrusal olmayan) bir amaç fonksiyonuna sahip tamsayı bir matematiksel model ortaya çıkmıştır. Lagrange gevşetmesi kullanılarak karesel formülasyon için sıkı alt ve üst sınırlar bulunabilmektedir. Önerilen Lagrange gevşetmesi, dal-sınır algoritmasının her düğümünde kullanılarak etkin bir kesin çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca, dal-sınır algoritmasında incelenen düğüm sayısını azaltmak amacıyla kısmi birerleme kullanılmıştır.

Yapılan analizlerde AP veri kümesinden alınan statik verilerin dinamik verilere dönüştürülmesiyle elde edilen problemler kullanılmıştır. Dört farklı problem

kümesi üzerinde yapılan analizler sonucunda geliştirilen çözüm yönteminin 100 düğüm ve 10 döneme sahip büyük boyutlu çok dönemli ADÜ yer seçimi problemleri için optimal sonuçları bulabildiği gösterilmiştir.

Çok dönemli ADÜ yer seçimi problemini ele alan ve yukarıda detaylı şekilde incelenen çalışmaların çeşitli açılardan karşılaştırılması Tablo 2.1’de özetlenmektedir. Buna göre, çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi şimdiye kadar sadece çok atamalı şekilde ele alınmış, tek atamalı durum daha önce hiç çalışılmamıştır. Diğer önemli bir nokta ise problemde yer alan ADÜ’ler için daha önce hiç kapasite tanımlanmamış olmasıdır. ADÜ ağı tasarımı kararları sadece Gelareh [23] tarafından ele alınmaktadır. Problemlerin amaç fonksiyonlarında enküçüklenen maliyet kalemleri birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Çalışmalarda geliştirilen modeller, sıfırdan tasarlanan sistemlerin yanı sıra mevcut sistemlere de uyarlanabilmektedir. Geliştirilen modellere önerilen çözüm yöntemleri üç çalışmada da birbirinden farklıdır.

Tablo 2.1’in son sütununda bu tez çalışmasında ele alınan çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi diğer çalışmalarla karşılaştırılarak özetlenmektedir. Bizim çalışmamızda, tek atamalı durum çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi kapsamında ilk defa ele alınmaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın literatürdeki diğer çok dönemli ADÜ yer seçimi çalışmalarından en önemli farkı, bizim çalıştığımız problemlerde ADÜ’ler için kapasite tanımlanmış olmasıdır. Maliyet parametreleri açısından, ADÜ’ler için geçerli sabit bir işletme maliyeti yerine ADÜ’lerde işlem gören akış başına bir operasyon maliyeti kullanılmaktadır.

Bir sonraki bölümde, bu çalışmada ele alınan çok dönemli ADÜ yer seçimi problemi detaylı bir şekilde tanımlanmakta ve problem için geliştirilen matematiksel modeller ayrıntılı bir biçimde incelenmektedir.

Tablo 2.1: Çok dönemli ADÜ yer seçimi çalışmalarının karşılaştırılması.

Problem Özellikleri	Campbell [7]	Gelareh [23]	Contreras vd. [13]	Tez çalışması
Çözüm uzayı	Sürekli	Ayrık	Ayrık	Ayrık
Atama kuralı	Çok	Çok	Çok	Tek & Çok
ADÜ kapasiteleri	-	-	-	+
ADÜ ağı tasarımı	-	+	-	+
Maliyet Parametreleri				
ADÜ yer seçimi	-	+	-	+
ADÜ bağlantısı kurma	-	+	-	+
Ulaşım	+	-	-	+
İşletme	-	-	-	+
Çözüm yöntemi	Sürekli yaklaşım	Yerel arama sezgiseli	Lagrange gevşetmesi kullan dal-sınır algoritması	Ticari çözücü

3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, bu yüksek lisans tezi çalışması boyunca ele alınan ve tezin temelini oluşturan ADÜ yer seçimi problemi açıklanmaktadır. Ele alınan problem detaylı bir şekilde tanımlandıktan sonra problemin modellenebilmesi için ihtiyaç duyulan parametre ve karar değişkenleri tanımlanmaktadır. Problemin iki farklı durumu için önerilen iki karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli incelenmekte, sonrasında ise modeller için önerilen geçerli eşitsizlikler anlatılmaktadır.

3.1 Problem Tanımı

Çok Dönemli Planlama Çevreninde Modüler Kapasiteli ADÜ Yer Seçimi ve ADÜ Ağı Tasarımı Problemi ile verilen ayrık bir düğüm kümesindeki düğümler arasında talep edilen akışın tamamının en az maliyetle gönderilmesi amaçlanmaktadır. Planlama çevreni boyunca katlanılacak toplam maliyet en küçüklenirken, talebin karşılanabilmesi için ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi ve ADÜ ağının tasarlanması gerekmektedir. Problem, adında da belirtildiği gibi çok dönemli bir problemdir ve çözümü sınırlı bir süreye sahip planlama çevrenini kapsamaktadır. Ele alınan problemde, planlama çevreni boyunca her dönem başında veya sonunda aşağıdaki kararlar verilmektedir:

- Kurulacak olan ADÜ'lerin yerleri (yer seçimi kararları),

- Kurulacak olan ADÜ'lerin kapasiteleri (kapasite kararları),
- Talep düğümlerinin hizmet alacakları ADÜ'ler (atama kararları),
- Kurulacak ADÜ'ler arasında işletilecek ADÜ bağlantıları (ADÜ ağı tasarımı),
- Tasarlanmış ağ üzerinde, talep noktaları arasındaki akışın rotalanması.

Problemde yukarıda belirtilen kararlar alınırken planlama çevreni boyunca karar vericinin katlanacağı toplam maliyetin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Toplam maliyete dahil olan maliyet kalemleri arasında ADÜ kurmanın sabit maliyeti, ADÜ bağlantısı işletme maliyeti, ADÜ'ler için kapasite modülü kurma maliyeti, kurulan ADÜ'lerde birim akış başına operasyonel maliyet ve akış rotalama maliyeti bulunmaktadır. Tasarlanan ağ üzerinde akış rotalama maliyeti birleştirme akışı, transfer akışı ve dağıtım akışı maliyeti olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Kurulmuş ADÜ'ler arasında gerçekleşen transfer akışında büyük miktarlarda akış gönderildiği ve bu sayede ölçek ekonomisinden yararlandığı daha önce de belirtilmişti. Bu akış için kullanılacak ölçek ekonomisi parametresinin planlama çevreni boyunca tüm dönemlerde eşit olduğu ve planlama çevreninin başında bilindiği varsayılmaktadır. Ayrıca, planlama çevreninde tüm dönemlerdeki talep hakkında bir öngörü yapıldığı ve bu verinin de planlama çevreninin başında bilindiği kabul edilmektedir.

Bu çalışmada ele alınan problem için matematiksel model geliştirilirken yapılan diğer varsayımlar birkaç bölüm halinde anlatılmaktadır. Bunlar, planlama çevreni, ADÜ ağı, atamalar, kapasite ve akış ile ilgili varsayımlardır.

Planlama çevreni için geçerli varsayımlar, literatürdeki birçok çok dönemli çalışmaya benzer niteliktedir. Problemde, karar verici için ele alınan planlama çevreni dönemlere bölünmüştür ve sonlu bir süreye sahiptir. Daha önce de belirtildiği gibi planlama çevreni boyunca tüm kararlar ilgili dönemin başında veya bir önceki dönemin sonunda alınmaktadır.

ADÜ ağı ile ilgili varsayımlar problemde ADÜ'ler ve ADÜ bağlantıları için verilen kararları içermektedir. Bu çalışmadaki problemde, planlama çevreni boyunca

tasarlanan ağda, yeni bir ADÜ kurulabilmekte fakat önceki dönemlerde kurulmuş mevcut bir ADÜ'nün kapatılmasına izin verilmemektedir. Gerçek hayatta taşımacılık sektöründe karşımıza çıkan ADÜ ağlarında, çalışanların işlerine son verilmesi gerekliliği, kullanılan alan ve ekipmanın boşa çıkması gibi nedenlerle ADÜ'lerin kapatılmasının tercih edilmediği gözlemlenmiştir. Uygulamadaki bu gözleme dayanarak, kapatma kararları bu çalışmadaki problemin kapsamına dahil edilmemiştir. Ayrıca, ADÜ ağı tasarımı yapılırken planlama çevreni boyunca her dönemde ADÜ'ler arasında farklı ADÜ bağlantıları işletilebilir. Bu sayede, planlama çevreni boyunca tüm dönemlerde birbirinden farklı bir ağ tasarımı yapılabilmektedir.

Tek atamalı ve çok atamalı durumlar bu tez kapsamında ayrı ayrı ele alınmaktadır. Her iki durumda da, planlama çevreni boyunca her dönemde atama kararları değişebilir. Talep düğümleri her dönemde farklı bir ADÜ'den ya da ADÜ'lerden hizmet alabilmektedir.

Bu çalışmada, kapasite ile ilgili düşünülen varsayımlar arasında, ADÜ kapasitelerinin modüler olduğu ve her ADÜ için farklı boyutlarda kapasite modüllerinin kurulabileceği bulunmaktadır. Ayrıca, planlama çevreni boyunca mevcut bir ADÜ'nün kapasitesi arttırılabilmekteyken, kapasite azaltılmasına izin verilmemektedir. ADÜ kapasitelerinin modüler olarak arttırılabilmemesinin nedeni birçok uygulamada tesis kapasitelerinin (üretim tesisine yeni bir hat eklemek, depoya yeni kapılar eklemek gibi) aşamalı şekilde artmasının bir sonucudur. Kapasiteyi ilgilendiren diğer bir varsayım da planlama çevreni boyunca her dönemde bir ADÜ'ye en fazla bir kapasite modülü kurulabilmesidir.

Ele alınan problemde literatürden farklı olarak bir ADÜ'nün kapasitesi birleştirme akışının yanında transfer akışını da kapsamaktadır. Bu problemde, ADÜ ağı tasarımı da yapıldığından, ADÜ alt ağının her zaman tam serim olmayacağı, bu nedenle de, herhangi iki talep noktası arasındaki akışın ikiden fazla ADÜ üzerinden gönderilebileceği bilinmektedir. Sonuç olarak, iki talep noktası arasında gönderilen her birim akışın rota üzerinde uğradığı her ADÜ'de tekrar operasyona ihtiyaç duyabilmesi nedeniyle ADÜ kapasitesine birleştirme akışının yanında transfer akışı da dahil edilmektedir.

Son olarak, akış ile ilgili varsayımlar dahilinde potansiyel bir ADÜ'nün sırasıyla kendinde başlayan ve biten akışın tamamını birleştirmesi ve dağıtması gerekmektedir. Problem kapsamında ele alınan bu akış bütünlüğü varsayımı, ADÜ'ler arasında ölçek ekonomisi ile maliyet avantajı kazandırılan tek tip akışın (transfer akışı) rotalanabilmesinin bir sonucudur.

3.2 Problem Parametreleri

Bu kısımda, ele alınan problem için önerilen matematiksel modeller için gereken parametre ve kümelerin tanımı yapılmakta, problemlerdeki kullanım amaçlarına göre bölümler halinde anlatılmaktadır.

Kümeler:

N	Düğüm kümesi.
T	Dönemler kümesi.

Problem tanımında da belirtildiği gibi karar vericinin planlama çevresinin başında sahip olduğu bir veri olan düğüm kümesi ayrı bir kümedir. Planlama çevresi de sonlu bir süreye sahiptir ve birden fazla dönemden oluşmaktadır.

Akış ve Kapasite Parametreleri:

w_{ij}^t	$t \in T$ döneminde, başlangıç noktası $i \in N$ düğümü, bitiş noktası $j \in N$ düğümü olan akışın miktarı.
$O_i^t = \sum_{j \in N} w_{ij}^t$	$t \in T$ döneminde başlangıç noktası $i \in N$ düğümü olan toplam akış miktarı.
$D_i^t = \sum_{j \in N} w_{ji}^t$	$t \in T$ döneminde bitiş noktası $i \in N$ düğümü olan toplam akış miktarı.
Q_k	$k \in N$ düğümüne yerleştirilecek bir ADÜ için geçerli birbirinden farklı modül tipleri kümesi.

Γ_k^q $k \in N$ düğümüne yerleştirilecek bir ADÜ'ye kurulacak $q \in Q_k$ tipi modülün kapasite miktarı.

Ele alınan problem modellenirken üç akış parametresi kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi, düğüm kümesi N 'de bulunan her talep düğümü çifti arasında her dönem gönderilmesi gereken akış miktarıdır. Bunun yanında bir talep düğümünde başlayan, diğer bir deyişle bir talep düğümünden düğüm kümesindeki diğer tüm düğümlere gönderilmesi gereken, toplam akış miktarını gösteren bir parametre daha bulunmaktadır. Bu akış ilgili talep düğümünün atandığı ADÜ ya da ADÜ'lere birleştirme akışı olarak gönderilmektedir. Problem parametreleri arasındaki son akış parametresi ise bir talep düğümünde biten, diğer bir deyişle düğüm kümesindeki diğer düğümlerden bir talep düğümüne gönderilmesi gereken, toplam akış miktarını göstermektedir. Bu akış ilgili talep düğümünün hizmet aldığı ADÜ'lerden bu talep düğümüne gönderilmekte ve bu akışa dağıtım akışı adı verilmektedir.

Kapasite ile ilgili iki parametre bulunmaktadır. Birincisi, ADÜ'lere kurulacak farklı boyutlardaki kapasite modüllerini içeren ve sonlu bir eleman sayısına sahip olan modül tipleri kümesidir. İkinci parametre ise modül tipleri kümesinde bulunan farklı boyutlardaki modül tiplerinin kapasite miktarlarını belirtmektedir.

Maliyet Parametreleri:

f_k^t $t \in T$ döneminde, $k \in N$ düğümüne ADÜ kurmanın sabit maliyeti.

g_{kl}^t $t \in T$ döneminde, $k \in N$ ve $l \in N$ düğümleri arasında ADÜ bağlantısı işletme maliyeti.

h_k^{qt} $t \in T$ döneminde, $k \in N$ düğümündeki ADÜ'ye $q \in Q_k$ tipi kapasite modülünü kurmanın maliyeti.

p_k^t $t \in T$ döneminde, $k \in N$ düğümündeki ADÜ'de işlem gören birim akış başına operasyon maliyeti.

c_{ij}^t $t \in T$ döneminde, $i \in N$ düğümünden $j \in N$ düğümüne bir birim akış göndermenin maliyeti.

α ADÜ'ler arasındaki transfer akışı için uygulanan ölçek ekonomisi parametresi.

Problemin amaç fonksiyonunun oluşturan toplam maliyet hesaplanırken maliyet kalemlerine karşılık gelen ve modelde kullanılan altı adet maliyet parametresi bulunmaktadır. Bunlar, ADÜ kurmanın maliyeti, ADÜ bağlantısı işletme maliyeti, kapasite modülü kurma maliyeti, işlem gören birim akış başına operasyonel maliyet ve akış gönderme maliyetidir. Bunların dışında, problem tanımında belirtilen, ADÜ'ler arasında birleştirilerek gönderilen transfer akışı için kullanılan ölçek ekonomisi parametresi bulunmaktadır.

3.3 Tek Atamalı Problem için Matematiksel Model

Bu bölümde, her talep düğümünün yalnızca tek bir ADÜ'den hizmet aldığı tek atamalı problem için geliştirilen karışık tamsayılı matematiksel modelin tüm bileşenleri detaylı bir şekilde incelenmektedir.

Tek atamalı problemin karışık tamsayılı matematiksel modeline ait karar değişkenleri aşağıda tanımlanmaktadır. Modelde üçü tamsayılı, biri devamlı olmak üzere dört farklı karar değişkeni bulunmaktadır. Tamsayılı (ikili) değişkenler yer seçimi ve atama, ADÜ bağlantısı işletme ve kapasite modülü kurma kararlarını temsil etmektedir. Devamlı değişken ise ağ üzerinde gönderilen transfer akışı için kullanılmaktadır.

$$x_{ik}^t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde } i \text{ düğümü ADÜ } k' \text{ye atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (i, k \in N, t \in T)$$

($x_{kk}^t = 1$ $t \in T$ döneminde $k \in N$ düğümünde bir ADÜ işletildiğini göstermektedir.)

$$z_{kl}^t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde } k \text{ ve } l \text{ düğümlerindeki ADÜ'ler arasında bir} \\ & \text{ADÜ bağlantısı işletiliyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (k, l \in N : k < l, t \in T)$$

$$u_k^{qt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde ADÜ } k \text{'ye } q \text{ tipinde bir kapasite modülü} \\ & \text{kurulduysa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (k \in N, q \in Q_k, t \in T)$$

$y_{kl}^{it} = t$ döneminde başlangıç noktası i düğümü olan ve ADÜ k 'den ADÜ l 'ye gönderilen transfer akışı miktarı ($i, k, l \in N, t \in T$).

Tek atamalı problem aşağıdaki şekilde modellenmektedir:

$$(P_1) \quad \begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} c_{ik}^t O_i^t x_{ik}^t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha c_{kl}^t y_{kl}^{it} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} c_{ki}^t D_i^t x_{ik}^t \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} p_k^t \left(\sum_{i \in N} O_i^t x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \right) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{q \in Q_k} h_k^{qt} u_k^{qt} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} f_k^t (x_{kk}^t - x_{kk}^{t-1}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N: k < l} g_{kl}^t z_{kl}^t \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$s. t. \quad \sum_{k \in N} x_{ik}^t = 1 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (3.2)$$

$$x_{ik}^t \leq x_{kk}^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.3)$$

$$x_{kk}^{t-1} \leq x_{kk}^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.4)$$

$$\sum_{q \in Q_k} u_k^{qt} \leq x_{kk}^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} O_i^t x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{l \in N, l \neq k} y_{kl}^{it} - \sum_{l \in N, l \neq k} y_{lk}^{it} = O_i^t x_{ik}^t - \sum_{j \in N} w_{ij}^t x_{jk}^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.7)$$

$$z_{kl}^t \leq x_{kk}^t \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.8)$$

$$z_{kl}^t \leq x_{ll}^t \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.9)$$

$$y_{kl}^{it} + y_{lk}^{it} \leq O_i^t z_{kl}^t \quad \forall i, k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.10)$$

$$x_{ik}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.11)$$

$$x_{kk}^0 = 0 \quad \forall k \in N \quad (3.12)$$

$$z_{kl}^t \in \{0, 1\} \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.13)$$

$$u_k^{qt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N, q \in Q_k, t \in T \quad (3.14)$$

$$y_{kl}^{it} \geq 0 \quad \forall i, k, l \in N, t \in T \quad (3.15)$$

Tek atamalı model (P_1) 'in amaç fonksiyonunda (3.1) planlama çevreninin tüm dönemlerinde karşılaşılan maliyet kalemlerinin toplamı enküçülenmektedir. Bu maliyet kalemleri sırasıyla, birleştirme, transfer ve dağıtım akışının toplam rotalama maliyeti, ADÜ'lerde işlem gören toplam akış için operasyonel maliyet, ADÜ'lere kapasite modülü kurma maliyeti, ADÜ kurmanın sabit maliyeti ve ADÜ bağlantısı işletme maliyetlerinden oluşmaktadır.

Eşitsizlik (3.2) sayesinde başlangıçta bize verilen düğüm kümesindeki her düğüm, hizmet alması için tek bir ADÜ'ye atanmalıdır. ADÜ kurulan düğümdeki talebin o noktada kurulan ADÜ'ye atandığı kabul edilmektedir. Eşitsizlik (3.3) ise her dönemde talep düğümlerinin hizmet alabilmek için yalnızca kurulmuş olan ADÜ'lere atanmasını garanti etmektedir. (3.4) eşitsizliği, bir dönemde kurulan bir ADÜ'nün planlama çevreninin ilerleyen dönemlerinde açık kalmasını sağlamaktadır.

ADÜ kapasitesi ve kapasite modülleri ile ilgili eşitsizlikler olan (3.5) ve (3.6)'dan birincisi planlama çevreni boyunca kurulmuş olan bir ADÜ'ye her dönemde en fazla bir tane kapasite modülü eklenebileceğini söylemektedir. (3.6) ise ADÜ'lere gelen akış için kullanılan kapasite kısıtlarıdır. Ele alınan problemde, varsayımlarda da belirtildiği gibi, bir ADÜ'ye giren birleştirme ve transfer akışının toplamı ilgili ADÜ'nün kapasitesini aşmamalıdır. Bununla birlikte, bir ADÜ'nün herhangi bir dönemdeki kapasitesi, o ADÜ'ye planlama çevreninin başından ilgili döneme kadar kurulmuş olan modüllerin kapasitelerinin toplanmasıyla elde edilmektedir.

(3.7) eşitsizliği gelen ve giden akışların dengelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Tasarlanan ağda kurulmuş her ADÜ için her dönemde akış dengesinin sağlanmış olması gerekmektedir. Eşitsizliğin sol tarafındaki terimler sırasıyla ilgili ADÜ'den diğer ADÜ'lere gönderilen ve diğer ADÜ'lerden ilgili ADÜ'ye gelen toplam transfer akışını temsil etmektedir. Eşitsizliğin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla ilgili ADÜ'ye atanan talep noktalarından gelen toplam birleştirme akışını ve ilgili ADÜ'den yine bu ADÜ'ye atanan talep noktalarına gönderilen toplam dağıtım akışını belirtmektedir.

Eşitsizlikler (3.8) ve (3.9) ile ancak kurulmuş olan ADÜ'ler arasında bir ADÜ bağlantısının işletilebilmesi sağlanmaktadır. Sonraki eşitsizlik olan (3.10)'a göre ise ancak işletilmekte olan ADÜ bağlantıları üzerinde transfer akışının gönderilebileceği söylenmektedir. Bir ADÜ bağlantısının işletilip işletilmediğini belirleyebilmek için bağlantının tek yönlü ya da yönsüz şekilde yazılması problemin modellenebilmesi için yeterlidir. Bu nedenle, bu üç kısıt da sadece $k < l$ indisleri için yazılmaktadır. Fakat işletilen bir ADÜ bağlantısı üzerinde sadece tek yönde değil iki yönde de transfer akışı gönderilebilmektedir. Bu nedenle, (3.10)'un sol tarafında, iki yöndeki akışı temsil eden iki sürekli değişken toplanmaktadır. Sağ taraftaki O_i^t parametresi de Büyük-M görevi üstlenerek kısıtın istenilen şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Son olarak, (3.11)-(3.15) eşitsizlikleri işaret ve tamsayı kısıtlarıdır.

Tek atamalı problem için geliştirilmiş olan bu model, işletilmeye sıfırdan başlatılacak sistemlerin yanı sıra halihazırda işletilmekte olan sistemlerin genişletilmesi için de kullanılabilir. Bunun için, (P_1) 'de birtakım güncellemeler yapmak gerekmektedir. Öncelikle, ağda mevcut durumda ADÜ olarak işletilen düğümleri gösteren bir kümeye ve işletilen mevcut ADÜ'lerin kapasitelerini belirten bir parametreye ihtiyaç duyulmaktadır.

- N^0 Planlama çevreninin başında ADÜ olarak işletilen düğümler kümesi.
- u_k^0 Planlama çevreninin başında $k \in N^0$ düğümünde işletilen mevcut ADÜ'nün kapasitesi.

Yukarıda tanımlanan yeni parametrelere, planlama çevreninin başında işletilen tüm ADÜ'leri gösteren $x_{kk}^0 = 1 \forall k \in N^0$ kısıtı eklenmeli ve (P_1) 'deki (3.6) eşitsizliği aşağıdaki eşitsizlikler ile değiştirilmelidir:

$$\sum_{i \in N} O_i^t x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N \setminus N^0, t \in T \quad (3.16)$$

ve

$$\sum_{i \in N} O_i^t x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq u_k^0 + \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N^0, t \in T \quad (3.17)$$

Bir sonraki kısımda, ele alınan problemin çok atamalı durumu için geliştirilen matematiksel model sunulmaktadır.

3.4 Çok Atamalı Problem için Matematiksel Model

Bu bölümde, her talep düğümünün birden fazla ADÜ'den hizmet alabildiği çok atamalı problem için geliştirilen karışık tamsayılı matematiksel model incelenmektedir.

Çok atamalı problemin karışık tamsayılı matematiksel modeli için kullanılan değişkenler aşağıda tanımlanmaktadır. Modelde üçü tamsayılı, üçü de devamlı olmak üzere altı karar değişkeni bulunmaktadır. Tamsayılı (ikili) değişkenler sırasıyla, yer seçimi, ADÜ bağlantısı işletme ve kapasite modülü kurma kararlarını, devamlı değişkenler ise tasarlanan ağ üzerinde gönderilen birleştirme, transfer ve dağıtım akışlarını temsil etmektedir. Birleştirme ve dağıtım akışı değişkenleri aynı zamanda çok atamalı problemdeki atama kararlarını da göstermektedir.

$$\xi_k^t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde } k \text{ düğümünde bir ADÜ işletiliyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (k \in N, t \in T)$$

$$z_{kl}^t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde } k \text{ ve } l \text{ düğümlerindeki ADÜ'ler arasında bir} \\ & \text{ADÜ bağlantısı işletiliyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (k, l \in N : k < l, t \in T)$$

$$u_k^{qt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ döneminde ADÜ } k \text{'ye } q \text{ tipinde bir kapasite modülü} \\ & \text{kurulduysa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (k \in N, q \in Q_k, t \in T)$$

$x_{ik}^t = t$ döneminde başlangıç noktası i düğümü olan ve ADÜ k 'ye gönderilen birleştirme akışı miktarı ($i, k \in N, t \in T$).

$v_{lj}^{it} = t$ döneminde başlangıç noktası i düğümü olan ve ADÜ l aracılığıyla j düğümüne gönderilen dağıtım akışı miktarı ($i, l, j \in N, t \in T$).

$y_{kl}^{it} = t$ döneminde başlangıç noktası i düğümü olan ve ADÜ k 'den ADÜ l 'ye gönderilen transfer akışı miktarı ($i, k, l \in N, t \in T$).

Çok atamalı problem aşağıdaki şekilde modellenmektedir:

$$(P_2) \quad \text{Min} \quad \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} c_{ik}^t x_{ik}^t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha c_{kl}^t y_{kl}^{it} + \sum_{t \in T} \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} c_{lj}^t v_{lj}^{it} \\ + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} p_k^t \left(\sum_{i \in N} x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \right) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{q \in Q_k} h_k^{qt} u_k^{qt} \\ + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} f_k^t (\xi_k^t - \xi_k^{t-1}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N: k < l} g_{kl}^t z_{kl}^t \quad (3.18)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in N} x_{ik}^t = O_i^t \quad \forall i \in N, t \in T \quad (3.19)$$

$$\sum_{l \in N} v_{lj}^{it} = w_{ij}^t \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (3.20)$$

$$\xi_k^{t-1} \leq \xi_k^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.21)$$

$$\sum_{q \in Q_k} u_k^{qt} \leq \xi_k^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.23)$$

$$\sum_{l \in N, l \neq k} y_{kl}^{it} - \sum_{l \in N, l \neq k} y_{lk}^{it} = x_{ik}^t - \sum_{j \in N} v_{kj}^{it} \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.24)$$

$$x_{ik}^t \leq O_i^t \xi_k^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.25)$$

$$x_{ik}^t \leq O_i^t (1 - \xi_i^t) \quad \forall i, k \in N : i \neq k, t \in T \quad (3.26)$$

$$\sum_{i \in N} v_{ij}^{it} \leq D_j^t \xi_l^t \quad \forall j, l \in N, t \in T \quad (3.27)$$

$$v_{lj}^{it} \leq D_j^t (1 - \xi_j^t) \quad \forall i, j, l : l \neq j, t \in T \quad (3.28)$$

$$z_{kl}^t \leq \xi_k^t \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.29)$$

$$z_{kl}^t \leq \xi_l^t \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.30)$$

$$y_{kl}^{it} + y_{lk}^{it} \leq O_i^t z_{kl}^t \quad \forall i, k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.31)$$

$$\xi_k^t \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N, t \in T \quad (3.32)$$

$$\xi_k^0 = 0 \quad \forall k \in N \quad (3.33)$$

$$u_k^{qt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N, q \in Q_k, t \in T \quad (3.34)$$

$$z_{kl}^t \in \{0, 1\} \quad \forall k, l \in N : k < l, t \in T \quad (3.35)$$

$$x_{ik}^t \geq 0 \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3.36)$$

$$y_{kl}^{it} \geq 0 \quad \forall i, k, l \in N, t \in T \quad (3.37)$$

$$v_{lj}^{it} \geq 0 \quad \forall i, l, j \in N, t \in T \quad (3.38)$$

Çok atamalı model (P_2) 'nin amaç fonksiyonunda (3.18), tek atamalı problemde olduğu gibi, planlama çevreninin tüm dönemlerinde karşılaşılan maliyet kalemlerinin toplamı enküçüklenmektedir. Bu maliyet kalemleri sırasıyla birleştirme, transfer ve dağıtım akışının toplam rotalama maliyeti, ADÜ'lerde işlem gören toplam akış için operasyonel maliyet, ADÜ'lere kapasite modülü kurma maliyeti, ADÜ kurmanın sabit maliyeti ve ADÜ bağlantısı işletme maliyetlerinden oluşmaktadır.

Çok atamalı problemde, atama kararları tek atamalı problemden farklılıklar

göstermektedir. Talep düğümleri birden fazla ADÜ'den hizmet alabileceklerinden atamalar için ikili atama değişkenleri yerine sürekli akış değişkenleri kullanılmaktadır. (3.19) ve (3.20) eşitlikleri bu modeldeki atama kararları ile ilgili olan eşitliklerdir. (3.19) planlama çevreninin her bir döneminde her bir talep düğümünde başlayan akışın tamamının birleştirme akışı olarak ADÜ'lere gönderilmesini sağlamaktadır. (3.20) ise planlama çevreninin her bir döneminde her talep düğümünde biten akışın tamamının dağıtım akışı olarak ADÜ'lerden ilgili talep düğümüne gönderilmesini garanti etmektedir.

Eşitsizlik (3.21)'a göre, bir dönemde kurulan bir ADÜ'nün planlama çevreninin sonraki dönemlerinde de işletilmeye devam etmesi gerekmektedir.

(3.22) ve (3.23) eşitsizlikleri ADÜ'lerin kapasitesi ve kapasite modülleri ile ilgili eşitsizliklerdir. (3.22)'ye göre planlama çevreni boyunca kurulmuş olan bir ADÜ'ye her dönemde en fazla bir tane kapasite modülü eklenebilmektedir. (3.23) ise (P_2) için kapasite kısıtıdır. Bu kısıta göre, bir ADÜ'ye giren birleştirme ve transfer akışının toplamı ilgili ADÜ'nün kapasitesini geçmemelidir. Bir ADÜ'nün herhangi bir dönemdeki kapasitesi o ADÜ'ye planlama çevreninin başından ilgili döneme kadar kurulmuş olan modüllerinin kapasitelerinin toplanmasıyla bulunmaktadır.

(3.24) eşitsizliği çok atamalı problemin akış dengesi kısıtıdır ve ADÜ'lere gelen ve giden akışların dengelenmesi için kullanılmaktadır. Eşitsizliğin sol tarafındaki birinci terim ilgili ADÜ'den diğer ADÜ'lere giden, ikinci terim ise diğer ADÜ'lerden ilgili ADÜ'ye gelen toplam transfer akışını temsil etmektedir. Eşitsizliğin sağ tarafındaki birinci terim, talep noktalarından ilgili ADÜ'ye gelen toplam birleştirme akışını, diğer terim ise ilgili ADÜ'den talep noktalarına gönderilen toplam dağıtım akışını göstermektedir.

Ele alınan problemde ADÜ'ler arasında sadece ölçek ekonomisinden faydalanan tek tip akışın (transfer akışı) gönderilmesine izin verildiğinden daha önce de bahsedilmişti. Bunun yanı sıra, talep düğümleri arasında herhangi bir ADÜ kullanılmadan (doğrudan) akış gönderilemediği belirtilmişti. Problem kapsamında bulunan bu varsayımların, çok atamalı problemde modellenebilmesi için (3.25)-(3.28) eşitsizliklerinden yararlanılmaktadır. İlk iki eşitsizlik birleştirme akışını,

sonraki eşitsizlikler ise dağıtım akışını ele almaktadır. Buna göre her dönemde, (3.25)'de herhangi bir talep düğümünden başlayan bir akışın ancak kurulmuş bir ADÜ'ye birleştirme akışı olarak gönderilmesine izin verilirken; (3.26)'de ise kurulmuş bir ADÜ'de başlayan bir akışın birleştirme akışı olarak başka bir ADÜ'ye gönderilmesi engellenmektedir. Her dönemde, (3.27) ile herhangi bir talep düğümünde biten akışın ancak kurulmuş bir ADÜ üzerinden dağıtılmasına izin verilirken; (3.28) ile kurulmuş bir ADÜ'de biten akışın dağıtım akışı olarak başka bir ADÜ üzerinden gönderilmesi engellenmektedir.

(3.29) ve (3.30) eşitsizlikleri ile ancak kurulmuş olan ADÜ'ler arasında bir ADÜ bağlantısının işletilebilmesi, (3.31)'e göre ise ancak işletilmekte olan ADÜ bağlantıları üzerinde transfer akışının gönderilebilmesi sağlanmaktadır. Bir ADÜ bağlantısının işletildiğini belirleyebilmek için bağlantının tek yönlü ya da yönsüz şekilde yazılması yeterli olmaktadır. Bu nedenle, bahsedilen üç kısıtın da $k < l$ indisleri için yazılması problemin doğru modellenebilmesini sağlamaktadır. Fakat, işletilen bir ADÜ bağlantısı üzerinde iki yönlü transfer akışı gönderilebilmektedir. Buna dayanarak, (3.31) eşitsizliğinin sol tarafında, iki yönde de gönderilebilen transfer akışını temsil eden sürekli değişkenler toplanmaktadır. Eşitsizliğin sağ tarafındaki O_i^t parametresi Büyük-M görevi görmekte ve kısıtın istenilen şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Son olarak, (3.32)-(3.38) eşitsizlikleri (P_2) için işaret ve tamsayı kısıtlarıdır.

Tek atamalı problemde belirtildiği gibi, çok atamalı problem için geliştirilmiş olan bu model de mevcut bulunan sistemlerin genişletilmesi için kullanılabilir. Bunun için, mevcut sistemde ADÜ olarak işletilen düğümleri içeren bir kümeye ve işletilen mevcut ADÜ'lerin kapasitelerini temsil eden bir parametreye ihtiyaç duyulmaktadır.

N^0	Planlama çevreninin başında ADÜ olarak işletilen düğümler kümesi.
u_k^0	Planlama çevreninin başında $k \in N^0$ düğümünde işletilen mevcut ADÜ'nün kapasitesi.

Tanımlanan yeni parametrelere planlama çevreninin başında işletilen tüm ADÜ'leri

gösteren $\xi_k^0 = 1 \forall k \in N^0$ kısıtı eklenerek (P_2) 'deki (3.23) eşitsizliği şu eşitsizlikler ile değiştirilmelidir:

$$\sum_{i \in N} x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N \setminus N^0, t \in T \quad (3.39)$$

ve

$$\sum_{i \in N} x_{ik}^t + \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} y_{lk}^{it} \leq u_k^0 + \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall k \in N^0, t \in T \quad (3.40)$$

Bu bölümde bu noktaya kadar ele alınan problemin parametreleri, karar değişkenleri ve problemin iki farklı durumu için geliştirilen matematiksel modeller detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bir sonraki kısımda, geliştirilen matematiksel modellere önerilen geçerli eşitsizlikler anlatılmaktadır.

3.5 Geçerli Eşitsizlikler

Bölüm 3.3 ve 3.4 'de geliştirilen (P_1) ve (P_2) ile yapılan bir takım ön analizler sonucunda, matematiksel modellerin özellikle büyük boyutlu problemler için çok fazla CPU zamanına ihtiyaç duyabileceği gözlemlenmiştir. Büyük boyutlu problemleri nispeten daha kısa sürelerde çözebilmek için, tek ve çok atamalı problemlerin karışık tamsayılı doğrusal programlama modelleri için yeni geçerli eşitsizlikler geliştirilmiştir.

Önerilen ilk geçerli eşitsizlik kümesi ADÜ alt ağı ile ilgili yapılan bir gözleme dayanmaktadır. Aşağıda sunulan eşitsizlik (3.41a) (P_1) için modeli için, (3.41b) ise (P_2) için geçerlidir.

$$\sum_{k \in N} x_{kk}^t - 1 \leq \sum_{k \in N} \sum_{l \in N : k < l} z_{kl}^t \quad \forall t \in T \quad (3.41a)$$

$$\sum_{k \in N} \xi_k^t - 1 \leq \sum_{k \in N} \sum_{l \in N : k < l} z_{kl}^t \quad \forall t \in T \quad (3.41b)$$

(3.41a) ve (3.41b) eşitsizliklerine göre ADÜ ağında ADÜ sayısından en az bir eksik sayıda ADÜ bağlantısı işletilmelidir. Yani, ADÜ alt ağında eğer K tane ADÜ kurulmuşsa, kurulan ADÜ'ler arasında en az $K - 1$ tane ADÜ bağlantısı kurulmuş olmalıdır. Bu problemde, ADÜ'ler arasında sadece transfer akışı gönderilebildiğinden tasarlanmış ağda kurulan ADÜ'ler birbirine bağlı olmalıdır. Eğer ADÜ'ler arasında $K - 2$ tane ADÜ bağlantısı işletilirse, ADÜ'lerden en az biri diğerlerine bağlanamamış olur ve bu ADÜ birleştirme ve dağıtma operasyonu için kullanılamaz.

Kapasite ile ilgili olan (3.42) eşitsizliği hem (P_1) hem de (P_2) için geçerlidir:

$$\sum_{i \in N} O_i^t \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{k \in N} \sum_{q \in Q_k} \Gamma_k^q u_k^{q\tau} \quad \forall t \in T \quad (3.42)$$

Bu geçerli eşitsizliğe göre tasarlanan ağda her dönemde o döneme kadar kurulmuş modüllerin toplam kapasitesi ilgili dönemdeki toplam talebi karşılayacak seviyede olmalıdır. Her dönemde, ağda kurulan her ADÜ için yazılan (P_1) 'deki (3.6) ve (P_2) 'deki (3.23) kapasite eşitsizliklerinden her biri tüm ADÜ'ler üzerinden toplandığında elde edilen yeni eşitsizlik (3.42)'i kapsamaktadır. Bu nedenle (3.42) modellerin doğrusal gevşetme değerlerini iyileştirmemesi beklenmekte ancak bu eşitsizlikten çözücünün performansını iyileştirmek amacıyla yararlanılmaktadır.

Son geçerli eşitsizlik kümesi ise kurulan her ADÜ ile kapasite modülleri arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Aşağıda belirtilen eşitsizlik (3.43a) (P_1) için (3.43b) ise (P_2) için geçerlidir:

$$x_{kk}^t \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} u_k^{q\tau} \quad \forall t \in T \quad (3.43a)$$

$$\xi_k^t \leq \sum_{\tau=1}^t \sum_{q \in Q_k} u_k^{q\tau} \quad \forall t \in T \quad (3.43b)$$

Eğer planlama çevreni içindeki herhangi bir dönemde bir ADÜ işletilmekteyse, planlama çevreninin ilk döneminden, geçerli eşitsizliğin yazıldığı ilgili dönemin

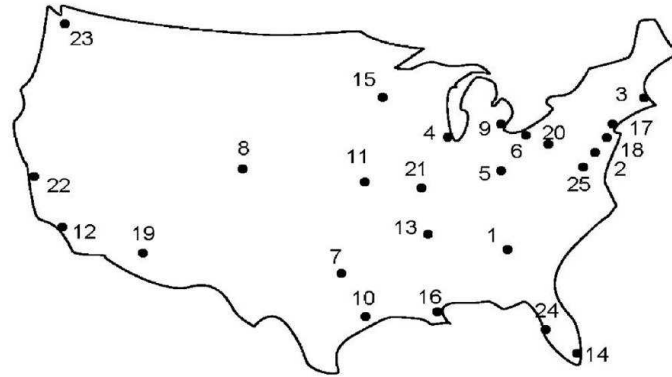
sonuna kadar ilgili ADÜ'ye en az bir tane kapasite modülü kurulmuş olması gerekmektedir.

Bir sonraki bölümde, ele alınan problem için geliştirilen matematiksel modellerin ve önerilen geçerli eşitsizliklerin test problemleri üzerinde analiz edildiği deneysel çalışma ve sonuçları yer almaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde, Bölüm 3'te geliştirilen matematiksel modeller hazırlanan test problemleri üzerinde çözülmekte ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bunun yanında, Bölüm 3.5'te önerilen geçerli eşitsizliklerin performansları da ölçülmektedir.

Test problemleri, literatürde sıklıkla kullanılan CAB veri [5] kümesinden alınan verilerin çok önemli problem verilerine dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. CAB veri kümesinde bulunan 25 düğümün coğrafi konumları Şekil 4.1'de, düğümlerin temsil ettikleri şehirler ise Tablo 4.1'de liste halinde gösterilmektedir. Bu veri kümesinde 10, 15, 20 ve 25 düğüm sayısına sahip alt problemler bulunmaktadır.



Şekil 4.1: CAB veri kümesi.

Tablo 4.1: CAB veri kümesindeki düğümler ve temsil ettikleri şehirler.

Düğüm	Şehir	Düğüm	Şehir	Düğüm	Şehir
1	Atlanta	10	Houston	19	Phoenix
2	Baltimore	11	Kansas City	20	Pittsburgh
3	Boston	12	Los Angeles	21	St. Louis
4	Chicago	13	Memphis	22	San Francisco
5	Cincinnati	14	Miami	23	Seattle
6	Cleveland	15	Minneapolis	24	Tampa
7	Dallas-Fort Worth	16	New Orleans	25	Washington DC
8	Denver	17	New York		
9	Detroit	18	Philadelphia		

CAB veri kümesinde, düğümler arası mesafe ve akış parametreleri yer almaktadır [5]. Ancak, bu veri kümesinde kapasite, ADÜ kurmanın sabit maliyeti, ADÜ bağlantısı işletme maliyeti ve kapasite modülü kurma maliyeti gibi veriler bulunmamaktadır. Bu veriler, çalışma kapsamında oluşturularak diğer verilere eklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan test problemlerine ait parametrelerin tamamı Tablo 4.2’de özetlenmektedir.

Tablo 4.2: CAB veri kümesi ve ilgili parametre değerleri.

Tanım	Parametre	Değer
Kümeler:		
Düğüm sayısı	$ N $	15, 25
Dönem sayısı	$ T $	5
Talep:		
Birinci dönemdeki talep	w_{ij}^1	OR Kütüphanesi [5]
Senaryo I (artan)	w_{ij}^t	%5 Sabit artan
Senaryo II (rassal)	w_{ij}^t	$\sim U[0, 9w_{ij}^{t-1}, 1, 2w_{ij}^{t-1}]$
Kapasite Modülü:		
Kapasite kümesi I (dar)	Γ_k^q	0,4, 0,5, 0,6
Kapasite kümesi II (geniş)	Γ_k^q	0,5, 0,75, 1
Maliyetler:		
ADÜ kurmanın sabit maliyeti	f_k^1	500
ADÜ bağlantısı işletme maliyeti	g_{kl}^1	Mesafenin %5’i
Kapasite modülü kurma maliyeti	h_k^{q1}	100 x Modül kapasitesi
Birim akış başına operasyon maliyeti	p_k^1	1
Birim akış başına ulaşım maliyeti	c_{ij}^1	OR Kütüphanesi [5]
Ölçek ekonomisi parametresi	α	0,2, 0,4, 0,6, 0,8

Ele alınan problemlerin boyutunu belirleyen en önemli parametreler düğüm ve dönem kümelerinin büyüklüğüdür. Bu çalışmada, CAB veri kümesinden

15 ve 25 düğümlü problemler üzerinde analiz yapılmaktadır. Her iki problem boyutu için de planlama çevreni 5 dönemden oluşmaktadır ve işletilmeye yeni başlanan sistemler için planlama yapıldığı varsayılmaktadır. Yani, planlama çevreninin başında halihazırda işletilmekte olan ADÜ veya ADÜ bağlantıları bulunmamaktadır.

Test problemlerindeki talep verisi için iki farklı senaryo ele alınmıştır. CAB veri kümesinin OR Kütüphanesi'nde [5] bulunan talep verisi, her iki senaryonun da ilk dönemdeki talep verisini oluşturmaktadır. Literatürde ADÜ yer seçimi problemlerinde CAB veri kümesini kullanan birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da talep düğümleri arasındaki talep, ilk dönemdeki toplam talep 1 olacak şekilde ölçeklendirilmektedir. Kullanılan iki senaryodan birincisinde (Senaryo I), ikinci dönemden itibaren her dönemde talep %5 oranında sabit olarak artmaktadır. İlk dönemdeki toplam talep 1 olduğundan, Senaryo I'de, ikinci dönemdeki toplam talep 1,05, üçüncü dönemdeki ise 1,1025 olmaktadır. Dördüncü ve beşinci dönemlerdeki talep de benzer şekilde artmaktadır. Çalışmadaki ikinci senaryoda (Senaryo II) ise, ikinci dönemden itibaren her talep düğümü çifti arasındaki talep, bir önceki dönemde gerçekleşen talebin $[0,9, 1,2]$ aralığından rassal bir sayıyla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Bu senaryoda, ikinci dönemdeki toplam talep $[0,9, 1,2]$ aralığında bir değer alırken, üçüncü dönemdeki toplam talep ise $[0,81, 1,44]$ arasında bir değer almaktadır.

Problemlerde, ADÜ'lere kurulan kapasite modülleri için dar ve geniş olmak üzere iki farklı kapasite kümesi bulunmaktadır. İki kümede de birbirinden farklı kapasitelere sahip üç modül yer almaktadır. Problemlerde, kapasite kümeleri ve modüller planlama çevreninin tüm dönemlerinde kurulacak tüm olası ADÜ'ler için aynıdır.

Problemdeki maliyet parametrelerinden sadece akış gönderme maliyeti literatürdeki veri kümesinde bulunmaktadır. Veri kümesinde bulunan düğümler arasındaki mesafeler planlama çevreninin ilk dönemindeki akış gönderme maliyeti olarak kullanılmaktadır. Birim akış başına ulaşım maliyetleri ilk dönemde 36,5 ile 2725,8 arasında değişmektedir. Planlama çevreninin ilk dönemindeki diğer maliyetler Tablo 4.2'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. İkinci dönemden itibaren

maliyet parametreleri için belirlenen tüm değerler, planlama çevreni boyunca her dönemde enflasyon oranında artmaktadır. Çalışmada belirlenen enflasyon oranı %2'dir ve her dönem için aynı olduğu kabul edilmiştir. Tablo 4.2'de gösterildiği gibi çalışmada, ADÜ'ler arasındaki akış için literatürde sıklıkla kullanılan dört farklı ölçek ekonomisi parametresi ele alınmıştır. Bunun yanı sıra, ölçek ekonomisinden kapasite modüllerinin maliyeti hesaplanırken de yararlanılmaktadır. Modüllerin kapasitesi artarken, kapasite başına birim maliyetin 0,1 oranında azaldığı varsayılmaktadır.

Geliştirilen matematiksel modeller, parametreleri yukarıda anlatılan test problemleri üzerinde IBM ILOG CPLEX 12.4 ticari yazılımı ile çözdürülmüştür. Bu testler sırasında üzerinde 64-bit Windows 7 kurulu iki adet Intel Xeon 2.40 GHz işlemciye ve 48 GB RAM belleğe sahip bir iş istasyonu kullanılmıştır.

Öncelikle geçerli eşitsizliklerin performansının ölçülmesi amaçlanmıştır. CAB veri kümesinden hazırlanan 15 düğümlü problemler üzerinde yapılan ve çözüm süresini karşılaştıran analizin sonuçları Tablo 4.3'te sunulmaktadır. Analiz sırasında üç farklı model test edilmiştir. Bunlar sırasıyla, hiçbir geçerli eşitsizliğin dahil edilmediği temel model, geçerli eşitsizliklerden (3.41) ile (3.42)'nin dahil edildiği model ve son olarak tüm geçerli eşitsizlikler (3.41), (3.42) ve (3.43)'ün dahil edildiği modeldir.

Tablo 4.3'ün ilk sütununda da görüldüğü gibi bu analizde toplamda 32 problem test edilmiştir. İkinci ve beşinci sütunlar arasında test edilen problemlerin parametreleri hakkında bilgi verilmektedir. Bunlar sırasıyla, ilgili problemde kullanılan atama kuralı, talep senaryosu, kapasite kümesi ve transfer akışı için yararlanılan ölçek ekonomisi parametresidir. Test edilen üç farklı modelin optimal şekilde çözülmesinden elde edilen çözüm süreleri, son üç sütunda saniye cinsinden sunulmaktadır. Tablonun en son satırında ise modellerden elde edilen sürelerin 32 problem üzerinden ortalamaları gösterilmektedir.

Tablo 4.3'te yapılabilecek ilk gözlem her problemde farklı bir modelin en iyi çözüm süresini elde etmesidir. Tek atamalı problemlerden ilk dördüne göz atılacak olursa, problemlerden birincisi için en iyi çözüm süresi tüm geçerli eşitsizlikler (3.41), (3.42) ve (3.43)'ün dahil edildiği üçüncü model ile elde

Tablo 4.3: Geçerli eşitsizlikler ile çözüm sürelerinin karşılaştırması.

Problem no	Atama kuralı	Talep	Kapasite	α	Çözüm Süresi (sn)		
					Temel model	(41)+(42)	(41)+(42) +(43)
1				0,2	1415,85	2025,00	934,90
2			Küme I	0,4	19725,80	10608,30	18354,87
3			(dar)	0,6	42568,29	13410,75	13675,63
4		Senaryo I		0,8	5067,24	8015,18	7181,97
5		(artan)		0,2	435,20	421,02	308,79
6			Küme II	0,4	284,86	422,73	385,06
7			(geniş)	0,6	120,59	86,11	105,11
8	Tek			0,8	31,61	30,02	23,54
9				0,2	650,40	651,07	503,35
10			Küme I	0,4	5012,50	4865,81	8972,04
11			(dar)	0,6	12203,49	11412,36	21130,09
12		Senaryo II		0,8	1661,93	4577,82	4433,36
13		(rassal)		0,2	1224,73	309,43	468,60
14			Küme II	0,4	992,68	499,34	320,24
15			(geniş)	0,6	126,07	104,40	86,67
16				0,8	37,99	31,12	45,55
17				0,2	1181,54	1101,62	1652,94
18			Küme I	0,4	1007,89	598,53	1271,81
19			(dar)	0,6	1038,84	450,20	698,10
20		Senaryo I		0,8	251,22	195,22	296,68
21		(artan)		0,2	1250,38	616,92	1063,13
22			Küme II	0,4	618,73	254,31	499,53
23			(geniş)	0,6	700,15	303,39	531,78
24	Çok			0,8	203,91	157,34	245,01
25				0,2	1227,87	893,56	1444,41
26			Küme I	0,4	809,29	527,49	1162,08
27			(dar)	0,6	933,81	509,39	684,88
28		Senaryo II		0,8	217,09	222,29	415,10
29		(rassal)		0,2	892,34	594,05	954,09
30			Küme II	0,4	595,99	242,21	362,62
31			(geniş)	0,6	392,19	236,40	557,89
32				0,8	217,78	118,25	193,29
Ortalama					3221,82	2015,36	2780,10

edilmektedir. Buna karşın, iki ve üç numaralı problemler ise eşitsizlikler (3.41) ve (3.42)'yi içeren ikinci model ile en hızlı şekilde çözülmektedir. Temel model ise dördüncü problem için en kısa sürede optimal sonucu vermiştir. Bu nedenle, çözüm süresi olarak modellerden herhangi birinin bir diğerine her zaman baskın olduğunu söyleyebilmek mümkün değildir. Fakat, bazı genel eğilimlerden söz

edilebilmektedir. Çok atamalı probleme ait 16 problemden 15'i için en iyi çözüm süreleri ikinci model ile elde edilmiştir. Buna dayanarak, ikinci modelin çok atamalı problem için daha kısa sürede optimal çözümü bulduğu söylenebilir.

Çözüm süresi analizi için genel bir çerçeve çizmek gerekirse, Tablo 4.3'te gösterilen 32 problemden 22'si (3.41) ve (3.42) geçerli eşitsizliklerinin yer aldığı ikinci model ile en kısa sürede çözülmüştür. Modellerin ortalama çözüm sürelerine bakıldığında, yine ikinci modelin en düşük ortalama süreye sahip olduğu gözlemlenmektedir. İkinci modelin, temel modele göre ortalamada yaklaşık 20 dakika daha hızlı çalıştığı görülmektedir.

Çalışmada geçerli eşitsizliklerin çözüm süresi dışındaki performanslarını değerlendirmek için ayrı bir analiz daha yapılmıştır. Bu analizde, Tablo 4.3'te sadece çözüm süresi açısından ele alınan modeller, çözüm süresine ek olarak, üç ölçüt ile daha karşılaştırılmaktadır. Bu ölçütler, problemin doğrusal gevşetmesinin optimal çözüme olan uzaklığı, dal-sınır algoritmasının kök düğümündeki çözümün optimal çözüme olan uzaklığı ve dal-sınır algoritmasının çözüm ağacındaki düğüm sayısıdır. Kök düğümünden elde edilen sonuç için, CPLEX'in kendi kesilerini ve sezgisel algoritmasını kullandıktan sonra ulaştığı en iyi çözümünden yararlanılmaktadır. Yine 15 düğümlü problemler kullanılarak yapılan bu karşılaştırmanın sonuçları tek atamalı problem için Tablo 4.4'te, çok atamalı problem için ise Tablo 4.5'te sunulmaktadır.

İlk karşılaştırma ölçütü olan doğrusal gevşetme performansına göre, bu analizde kullanılan tüm problemlerdeki en iyi performansa beklendiği gibi bütün geçerli eşitsizliklerin dahil edildiği model ile ulaşılmıştır. Kök düğümünden elde edilen sonucun uzaklığı ölçütünde modeller arasında değişkenlik görülmektedir. Beşi üçüncü model ile eşit olmak üzere, 32 problemden 19'unda ikinci model ile daha düşük kök düğüm uzaklığı elde edilmiştir. Dal-sınır ağacındaki düğüm sayısı ölçütünde ise atama kuralları arasında farklılıklar gözlemlenmektedir. Tek atamalı problemde modeller arasında baskınlık bulunmazken, çok atamalı 16 problemden 9'unda ikinci modelle daha az düğümün incelendiği görülmektedir. Fakat, algoritma ağacında incelenen düğüm sayısı ile çözüm süresi arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Bazı problemlerde daha az düğüm sayısının

daha uzun sürelerde incelendiği gör÷lmektedir.

Tablo 4.4: Tek atamalı problemde geçerli eşitsizliklerin etkileri.

Karşılaştırma ölçütü	Problem no	Temel model	(41)+(42)	(41)+(42)+ (43)	Problem no	Temel model	(41)+(42)	(41)+(42)+ (43)
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	1	5,94	4,85	4,36	9	5,78	4,57	4,10
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,72	1,47	1,53		1,40	1,38	1,34
B&B ağacındaki düğüm sayısı		12294	16588	10261		27	5493	3360
Çözüm süresi (sn)		1415,85	2025,00	934,90		650,40	651,07	503,35
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	2	6,21	5,68	5,37	10	6,06	5,52	5,22
Kök düğümün uzaklığı (%)		2,50	2,55	2,49		2,30	2,42	2,41
B&B ağacındaki düğüm sayısı		140770	83093	99925		50673	56172	93056
Çözüm süresi (sn)		19725,80	10608,30	18354,87		5012,50	4865,81	8972,04
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	3	5,86	5,97	5,90	11	5,62	5,41	5,35
Kök düğümün uzaklığı (%)		3,50	3,72	3,64		3,51	3,45	3,37
B&B ağacındaki düğüm sayısı		382663	246876	213316		209388	166334	217668
Çözüm süresi (sn)		42568,29	13410,75	13675,63		12203,49	11412,36	21130,09
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	4	5,64	5,53	5,50	12	5,51	5,34	5,32
Kök düğümün uzaklığı (%)		3,82	3,77	5,04		3,70	3,80	3,64
B&B ağacındaki düğüm sayısı		82979	127431	144816		45074	84118	87711
Çözüm süresi (sn)		5067,24	8015,18	7181,97		1661,93	4577,82	4433,36
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	5	5,31	4,22	3,27	13	5,39	4,18	4,18
Kök düğümün uzaklığı (%)		0,60	0,46	0,56		0,67	0,81	0,81
B&B ağacındaki düğüm sayısı		2603	2555	1543		26705	3972	20033
Çözüm süresi (sn)		435,20	421,02	308,79		1224,73	309,43	468,60
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	6	4,56	4,16	3,55	14	4,67	4,25	3,66
Kök düğümün uzaklığı (%)		0,88	0,86	0,86		1,04	1,02	1,02
B&B ağacındaki düğüm sayısı		2201	712	1330		7036	3657	2855
Çözüm süresi (sn)		284,86	422,73	385,06		992,68	499,34	320,24
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	7	2,37	2,23	2,02	15	2,51	2,35	2,35
Kök düğümün uzaklığı (%)		0,40	0,38	0,42		0,65	0,66	0,66
B&B ağacındaki düğüm sayısı		304	179	221		322	294	402
Çözüm süresi (sn)		120,59	86,11	105,11		126,07	104,40	86,67
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	8	1,52	1,26	1,17	16	1,75	1,39	1,30
Kök düğümün uzaklığı (%)		0,10	0,34	0,37		0,37	0,59	0,56
B&B ağacındaki düğüm sayısı		20	47	29		107	103	208
Çözüm süresi (sn)		31,61	30,02	23,54		37,99	31,12	45,55

Tablo 4.5: Çok atamalı problemde geçerli eşitsizliklerin etkileri.

Karşılaştırma ölçütü	Problem no	Temel model	(41)+(42)	(41)+(42)+ (43)	Problem no	Temel model	(41)+(42)	(41)+(42)+ (43)
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	17	7,98	6,51	5,90	25	7,75	6,27	5,69
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,78	1,64	1,63		1,53	1,43	1,43
B&B ağacındaki düğüm sayısı		1617	735	831		733	384	505
Çözüm süresi (sn)		1181,54	1101,62	1652,94		1227,87	893,56	1444,41
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	18	9,53	8,20	7,75	26	9,20	7,84	7,41
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,98	1,85	1,83		1,72	1,54	1,57
B&B ağacındaki düğüm sayısı		489	306	936		211	117	1170
Çözüm süresi (sn)		1007,89	598,53	1271,81		809,29	527,49	1162,08
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	19	10,87	9,40	9,11	27	10,50	9,01	8,74
Kök düğümün uzaklığı (%)		2,70	2,17	2,18		2,38	1,87	1,87
B&B ağacındaki düğüm sayısı		2055	141	423		1915	553	187
Çözüm süresi (sn)		1038,84	450,20	698,10		933,81	509,39	684,88
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	20	11,24	9,81	9,57	28	10,84	10,35	10,11
Kök düğümün uzaklığı (%)		2,60	1,55	1,57		2,30	1,31	1,28
B&B ağacındaki düğüm sayısı		371	92	88		51	46	73
Çözüm süresi (sn)		251,22	195,22	296,68		217,09	222,29	415,10
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	21	8,08	6,64	5,53	29	7,77	6,31	5,25
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,49	1,37	1,36		1,24	1,09	1,12
B&B ağacındaki düğüm sayısı		253	92	133		128	78	74
Çözüm süresi (sn)		1250,38	616,92	1063,13		892,34	594,05	954,09
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	22	9,00	7,67	6,85	30	8,66	7,31	6,50
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,11	0,00	0,96		0,80	0,00	0,00
B&B ağacındaki düğüm sayısı		25	0	17		25	0	0
Çözüm süresi (sn)		618,73	254,31	499,53		595,99	242,21	362,62
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	23	10,47	9,00	8,43	31	10,10	8,61	8,06
Kök düğümün uzaklığı (%)		2,04	1,55	1,56		1,71	1,24	1,25
B&B ağacındaki düğüm sayısı		823	525	39		47	15	59
Çözüm süresi (sn)		700,15	303,39	531,78		392,19	236,40	557,89
Doğrusal gevşetmesinin uzaklığı (%)	24	10,91	9,48	8,99	32	10,51	9,05	8,59
Kök düğümün uzaklığı (%)		1,99	1,10	1,11		1,70	0,90	0,91
B&B ağacındaki düğüm sayısı		33	11	11		36	9	7
Çözüm süresi (sn)		203,91	157,34	245,01		217,78	118,25	193,29

Yapılmış olan karşılaştırma hakkında genel bir yorum yapmak gerekirse, tüm geçerli eşitsizliklerin kullanıldığı modelin doğrusal gevşetme performansı hari-cindeki diğer ölçütlerde başarılı olduğu söylenemez. Bütün geçerli eşitsizliklerin dahil edildiği bu modelin diğerlerinden daha sıkı bir matematiksel model olmasına rağmen, çözüm süresi ve dal-sınır algoritması ağacındaki düğüm sayısı açısından birçok problemde (3.41) ve (3.42) eşitsizliklerinin kullanıldığı modelden daha başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, çalışmanın ilerleyen aşaması olan 25 düğümlü problemleri çözerken (3.41) ve (3.42) geçerli eşitsizliklerinin matematiksel modele eklenmesine karar verilirken, (3.43) eşitsizliğinin kullanılmaması uygun görülmüştür.

Geçerli eşitsizlikler ile yapılan performans analizinden sonra CAB veri kümesindeki tüm düğümleri içeren (25 düğümlü) problemler ele alınmıştır. ADÜ yer seçimi problemlerinin NP-Zor problemler olduğu bilinmektedir. Ele alınan problemlerin çok dönemli olması problemleri daha da zorlaştırmaktadır. Bir önceki analizde 15 düğümlü problemlerin optimal çözülebilmesi için bile uzun sürelere ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu nedenle, böylesine zor bir problemin büyük durumlarının optimal şekilde çözülmesi için daha da uzun çözüm sürelerine katlanması gerekecektir. Bu durumda, optimal sonucun elde edilmesi ile bu sonuca ulaşılabilmesi için çok uzun çözüm sürelerine katlanması arasındaki fayda/maliyet analizinin iyi yapılması gerekmektedir. Bu konuya, literatürdeki birçok çalışmada değinilmiş, ayrıca gerçek hayatta veri toplama veya öngörü sürecinde veri ile ilgili birçok hataya rastlanıldığı belirtilmiştir. Tek dönemli lojistik ağı tasarımı problemlerini ele alan Cordeau vd. [15] gerçek hayat problemlerinin, verilerde bulunan hatalardan dolayı en azından %1'lik tolerans ile çözümlenmesinin, çözüm süresini kısaltarak önemli tasarruflar sağlayacağını öne sürmüştür. Benzer bir yorum çok dönemli lojistik ağı tasarımı problemlerini konu alan Melo vd. [29] tarafından da yapılmıştır. Tek dönemli problemler ile karşılaştırıldığında çok dönemli bir problem için yapılmış olan veri öngörüsünde daha çok veri hatası bulunabileceği bu çalışmada vurgulanmıştır. Çok dönemli bir problemin ele alındığı bu tez çalışmasında da, öngörü yapılan veride tek dönemli bir problemden daha çok hata bulunabileceği yorumunu göz önünde bulundurarak CPLEX'in %1,50'lik tolerans ile çalıştırılmasına karar verilmiştir.

Tolerans konulmasına ek olarak, çözüm süresi için de 24 saatlik bir limit uygun görülmüştür. Bu şekilde tasarlanan analiz parametreleri ile elde edilen sonuçlar tek ve çok atamalı problem için sırasıyla Tablo 4.6 ve 4.7’de gösterilmektedir.

Tablo 4.6: Tek atamalı problem sonuçları.

Problem no	Talep	Kapasite	α	Toplam maliyet	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	
33	Senaryo I (artan)	Küme I (dar)	0,2	6863,47	1,4,12,17	I-I-I-I-I	
34			0,4	7835,33	5,11,12,17	I-I-I-I-I	
35			0,6	8505,57	2,4,8	C-I-I-I-I	
36			0,8	9035,59	4,8,20	C-I-I-I-I	
37		Küme II (geniş)	0,2	6805,36	4,12,18	I-I-I-I-I	
38			0,4	7550,82	4,12,18	I-I-I-I-I	
39			0,6	8321,05	2,12,21	I-I-I-I-I	
40			0,8	8890,21	4,8,20	I-I-I-I-I	
41		Senaryo II (rassal)	Küme I (dar)	0,2	6834,56	1,4,12,17	I-I-I-I-I
42				0,4	7789,76	5,12,18,21	I-I-I-I-I
43	0,6			8434,24	4,8,25	C-I-I-I-I	
44	0,8			8954,31	4,8,20	C-I-I-I-I	
45	Küme II (geniş)		0,2	6736,38	4,12,17	I-I-I-I-I	
46			0,4	7500,19	4,12,17	I-I-I-I-I	
47			0,6	8261,65	4,12,25	I-I-I-I-I	
48			0,8	8788,67	4,8,20	I-I-I-I-I	

Tablo 4.7: Çok atamalı problem sonuçları.

Problem no	Talep	Kapasite	α	Toplam maliyet	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	
49	Senaryo I (artan)	Küme I (dar)	0,2	6711,22	12,17,21	I-I-I-I-I	
50			0,4	7299,97	4,12,17	I-I-I-I-I	
51			0,6	7788,42	4,12,18	I-I-I-I-I	
52			0,8	8166,84	12,18,21	I-I-I-I-I	
53		Küme II (geniş)	0,2	6681,91	4,12,17	I-I-I-I-I	
54			0,4	7289,44	4,12,18	I-I-I-I-I	
55			0,6	7813,32	12,18,21	I-I-I-I-I	
56			0,8	8213,18	4,12,17	I-I-I-I-I	
57		Senaryo II (random)	Küme I (dar)	0,2	6675,23	4,12,17	I-I-I-I-I
58				0,4	7241,57	4,12,17	I-I-I-I-I
59	0,6			7732,12	4,12,17	I-I-I-I-I	
60	0,8			8099,58	4,12,18	I-I-I-I-I	
61	Küme II (geniş)		0,2	6651,94	12,18,21	I-I-I-I-I	
62			0,4	7261,27	12,18,21	I-I-I-I-I	
63			0,6	7738,86	4,12,18	I-I-I-I-I	
64			0,8	8137,75	12,18,21	I-I-I-I-I	

Tek ve çok atamalı problemin sonuçlarının ayrı ayrı sunulduğu Tablo 4.6 ve 4.7'nin ilk sütunlarında sırasıyla problem numaraları, talep, kapasite kümesi ve ölçek ekonomisinden oluşan problem parametreleri bulunmaktadır. Problemlere ilişkin sonuçların yer almaya başladığı beşinci sütunda elde edilen toplam maliyet (amaç fonksiyonu değeri), altıncı sütunda planlama çevreninin sonunda kurulan ADÜ'lerin yerleri ve son sütunda ise planlama çevreni boyunca her bir dönemde kurulan ADÜ ağının durumu gösterilmektedir. Bu sütundaki her satırda yer alan "C" harfi o dönem tasarlanan ADÜ ağının tam serim (complete) bir ağ olduğunu, "I" harfi ise o dönemki ADÜ ağının tam serim olmadığını (incomplete) belirtmektedir.

Alınan sonuçlara göre, planlama çevreni boyunca hem tek atamalı hem de çok atamalı tüm problemlerde açılan bütün ADÜ'lerin ilk dönemde işletilmeye başlandığı görülmektedir. Bu gözlem, toplu taşıma ağlarında çok dönemli ADÜ yer seçimi problemini ele alan Gelareh [23] çalışmasında yapılan yorum ile tutarlılık göstermektedir. Gelareh [23] bu durumun nedeninin ADÜ'lerden elde edilecek faydanın tesis için geçerli bakım-onarım maliyetlerine baskın çıkması olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da ADÜ'lerden planlama çevreninin ilk dönemlerinden itibaren faydalanılabilmesi ve ADÜ kurma maliyetlerinin her dönem enflasyon oranı ile %2 artması nedeniyle bu durumun gözlemlendiği düşünülmektedir. Yani, matematiksel model, planlama çevreni boyunca işletilecek ADÜ'leri daha küçük sabit maliyet ile kurmayı tercih etmektedir. Yer seçimi kararları dışındaki, kapasite, atama ve ADÜ ağı tasarımı kararları planlama çevreni boyunca zamanla değişmektedir. Problemlerde bulunan enflasyon oranı nedeniyle, incelenen tüm 25 düğümlü problemlerde kapasite modülleri planlama çevreninin ilk iki dönemi içerisinde kurulmaktadır. İncelenen problemlerde, yer seçimi ve kapasite kararlarının genellikle planlama çevreninin ilk dönemlerinde veriliyor olması sanıldığı gibi aksine, bu çalışmada önerilen çok dönemli planlamanın değerini azaltmamaktadır. Çok dönemli planlamanın, tek dönemli planlamaya göre avantajlı olduğu Bölüm 5'te yapılan analizlerde gösterilmektedir.

Yer seçimi kararları incelendiğinde, problemlerde yer alan farklı atama kuralları, talep senaryoları, kapasite kümeleri ve ölçek ekonomisi oranlarına göre ADÜ

yerlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, yer seçimi kararlarının belirli parametre değerlerine göre bir eğilim gösterdiğini söylemek mümkün olamamaktadır. Fakat, incelenen 32 problemin birçoğunda ADÜ'lerin genellikle diğerlerine göre daha fazla akış talep eden düğümlere kurulduğu gözlemlenmektedir. Bu düğümler arasında Chicago (4), Los Angeles (12) ve New York (17) bulunmaktadır.

Tablo 4.6 ve 4.7'nin son sütunlarında sunulan ADÜ ağı tasarımı kararları incelenecek olursa, tüm problemlerde planlama çevreninin sonunda tam serim bir ADÜ ağı tasarlanmadığı görülmektedir. ADÜ bağlantılarının işletme maliyeti düşünüldüğünde, tam serim bir ADÜ ağına ihtiyaç olmadığı görülmektedir.

Problemlerde verilen kapasite kararları Tablo 4.8'de detaylı olarak gösterilmektedir. Tek ve çok atamalı problemlere ait kararlar iki ayrı sütun halinde sunulmaktadır. Her bir problem için sütunlarda sırasıyla ele alınan problemin numarası, o problemdeki ADÜ'lerin yerleri ve işletilen ADÜ'lere kurulan kapasite modülleri görülmektedir. Kapasite kararları sütunundaki "K", "O", "B" sembolleri kapasite modülünün sırasıyla küçük, orta ve büyük olmak üzere boyutunu belirtmektedir. Bu semboller ilgili problemde açılan ADÜ'lerin indis sırasına ve dönemlere göre dizilmiştir. Örneğin, 33 numaralı problemde 4 ve 17 nolu ADÜ'lere ilk dönemde büyük, ikinci dönemde ise küçük kapasite modülü kurulmuştur. Buna karşın, 1 ve 12 nolu ADÜ'lere ise sadece ilk dönemde küçük boyutlu bir kapasite modülü kurulmuş, bu ADÜ'lerin kapasiteleri ilerleyen dönemlerde bir daha arttırılmamıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi, kapasite modülleri planlama çevreninin en geç ikinci dönemine kadar kurulmaktadır. Kapasite miktarları daha büyük modüllerin bulunduğu ikinci kapasite kümesinin kullanıldığı problemlerde, kapasite kararları planlama döneminin sadece ilk döneminde verilmiştir.

Sonuçları, Tablo 4.6 ve 4.7'de sunulan 32 problem ortalama 15 saatte çözülebilmektedir. Bu sürenin, uzun dönemli planlama yapılan stratejik bir planlama faaliyeti için makul bir süre olduğu söylenebilir. Bu analizde ele alınan 32 problemden yalnızca beş problem %1,50 tolerans ile 24 saat içerisinde çözülememiştir. Zaman limiti içinde çözülemeyen problemler için çözücü tarafından belirtilen ortalama uzaklık %3,87'dir. En kötü durumda çözücü %4,69 uzaklık ile 24 saat

Tablo 4.8: 25 düğümlü problemlerdeki kapasite kararları.

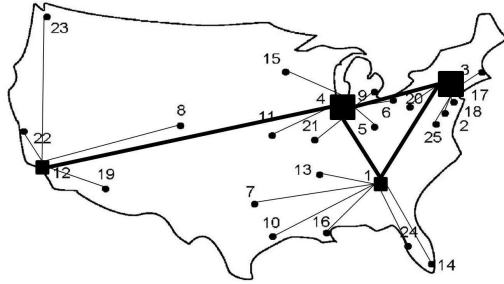
Tek Atamalı			Çok Atamalı		
Problem no	ADÜ yerleri	Kapasite kararları	Problem no	ADÜ yerleri	Kapasite kararları
33	1,4,12,17	K,B+K,K,B+K	49	12,17,21	K,B+K,B+K
34	5,11,12,17	B+K,O,K,B+K	50	4,12,17	B+K,K,B
35	2,4,8	B+K,B+K,K	51	4,12,18	B,K,B
36	4,8,20	B+K,K,B+K	52	12,18,21	K,B,B
37	4,12,18	B,K,B	53	4,12,17	O,K,O
38	4,12,18	B,K,B	54	4,12,18	O,K,O
39	2,12,21	B,K,O	55	12,18,21	K,O,O
40	4,8,20	O,K,B	56	4,12,17	O,K,O
41	1,4,12,17	K,B+K,K,B+K	57	4,12,17	B+K,K,B+O
42	5,12,18,21	B+K,K,B+K,B	58	4,12,17	B+K,K,B
43	4,8,25	B+K,K,B+K	59	4,12,17	B,K,B
44	4,8,20	B+K,K,B+K	60	4,12,18	B,K,B
45	4,12,17	B,K,O	61	12,18,21	K,O,O
46	4,12,17	B,K,B	62	12,18,21	K,O,O
47	4,12,25	B,K,B	63	4,12,18	O,K,O
48	4,8,20	O,K,B	64	12,18,21	K,O,K

sonra çözümü sonlandırmıştır.

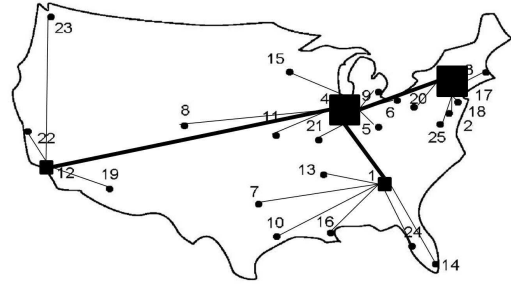
İncelenen 25 düğümlü problemlerden tek atamalı 33 ve 36 nolu problemler ile çok atamalı 51 ve 59 nolu problemlere ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.2 ve 4.3'te gösterilmektedir. Sonuçları harita üzerinde gösterilen problemlerden her biri için ilk resimde, planlama çevreninin ilk dönemi sonundaki, ikinci resimde ise planlama çevreninin sonundaki kararlar sunulmaktadır. Tüm resimlerde, kareler kurulan ADÜ'leri (yer seçimi kararlarını), kalın çizgiler ADÜ bağlantılarını (ADÜ ağı tasarım kararlarını), ince çizgilerle belirtilen bağlantılar ise talep düğümlerinin hizmet aldıkları ADÜ'leri (atama kararlarını) göstermektedir. ADÜ'leri gösteren karelerin boyutları ise ilgili ADÜ'ye kurulan kapasite modülünün büyüklüğünü temsil etmektedir. ADÜ'yü temsil eden kare büyüdükçe, planlama çevreni boyunca modül kurularak o ADÜ'nün kapasitesinin artırıldığı belirtilmektedir.

Şekil 4.2(a) ve 4.2(b)'de sonuçları gösterilen 33 numaralı problemde, 1, 4, 12 ve 17 numaralı düğümlere ADÜ kurulmuş, tüm dönemlerde tam serim olmayan bir ADÜ ağı tasarlanmıştır. Birinci dönemin sonunda ağda dört adet ADÜ bağlantısı işletilirken, planlama çevreninin ilerleyen dönemlerinde işletilen ADÜ bağlantısı sayısı üçe düşürülmüştür. Ağda kurulan iki ADÜ'ye (4 ve 17) planlama çevreninin

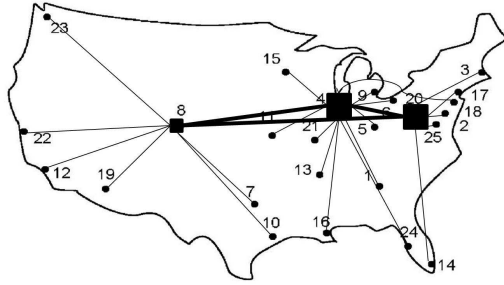
sonuna kadar geçen sürede ilave kapasite modülleri kurulmuştur. Bu kapasite kararları sonucunda 8 numaralı talep düğümünün atama kararı değişmiştir. Bu düğüm, ilk dönemde 12 numaralı düğüme kurulmuş ADÜ'den hizmet alırken, beşinci dönemin sonunda 4 numaralı düğüme kurulan ADÜ'den hizmet almaya başlamıştır.



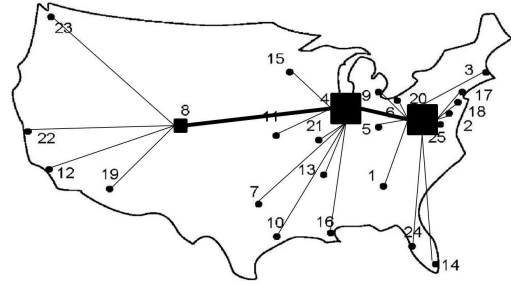
(a) Problem 33: Birinci dönemin sonu.



(b) Problem 33: Beşinci dönemin sonu.



(c) Problem 36: Birinci dönemin sonu.



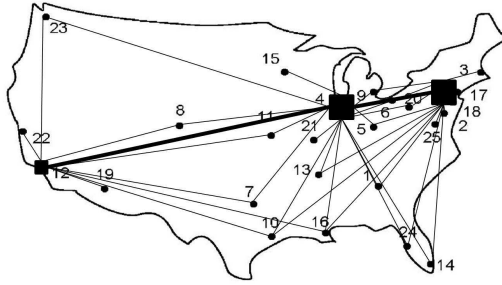
(d) Problem 36: Beşinci dönemin sonu.

Şekil 4.2: Tek atamalı problem sonuçları.

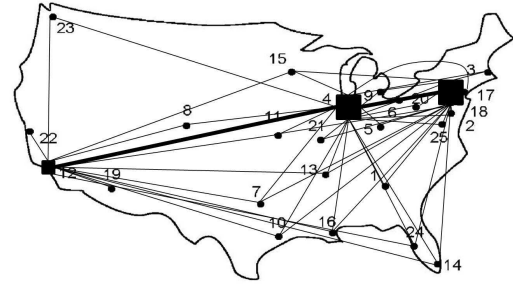
Tek atamalı problemlerden 36 numaralı probleme ait ağları gösteren Şekil 4.2(c) ve 4.2(d)'de görülebileceği üzere, ADÜ'ler 4, 8 ve 20 numaralı düğümlere kurulmuştur. Planlama çevrenin ilk döneminde tam serim bir ADÜ ağı işletilirken, ilerleyen dönemlerde tam serim bir ADÜ ağı işletilmemektedir. İkinci dönemde 4 ve 20 numaralı ADÜ'lere ek kapasite modülleri kurulmuştur. Bu problemde, planlama çevrenin ilk ve son dönemi arasında atama kararları büyük farklılıklar göstermektedir. Talep düğümlerinden sekiz tanesi (1, 5, 6, 7, 9, 10, 18 ve 24) planlama çevrenin ilerleyen dönemlerinde, ilk dönemde hizmet aldıkları ADÜ'den farklı bir ADÜ'ye atanmışlardır.

Şekil 4.3'te sonuçları sunulan 51 ve 59 numaralı çok atamalı problemlerin ikisinde

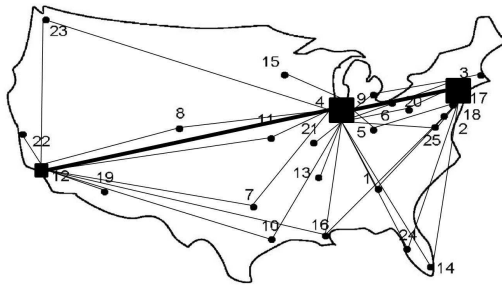
de yer seçimi, kapasite ve ADÜ ağı tasarımı kararları aynıdır. Bu problemlerde 4, 12 ve 17 numaralı düğümlere ADÜ kurulmuş, tam serim olmayan ADÜ ağına aynı ADÜ bağlantıları işletilmiştir. Problemler arasında yalnızca atama kararlarında farklılıklar gözlemlenmektedir. Buna göre, 51 numaralı problemin son döneminde dokuz talep düğümü, ilk dönemdeki atamalara (Şekil 4.3(a)) ek olarak farklı bir ADÜ'ye daha atanmıştır (Şekil 4.3(b)). Benzer bir durum 59 numaralı problem için de geçerlidir. Bu problemde, talep düğümlerinden on iki tanesi, planlama çevreninin ilerleyen aşamalarında ilave bir ADÜ'den daha hizmet almaktadır (Şekil 4.3(d)). Çok atamalı problemin, tek atamalı probleme göre karar verici açısından en büyük avantajı, 14 numaralı düğüm aracılığıyla gözlemlenebilmektedir. Bu talep düğümü, her iki problemde de planlama çevreninin son döneminde kurulan üç ADÜ'ye de atanarak, ADÜ'ler arasında kapasite kullanımının dengeli olmasını sağlamaktadır.



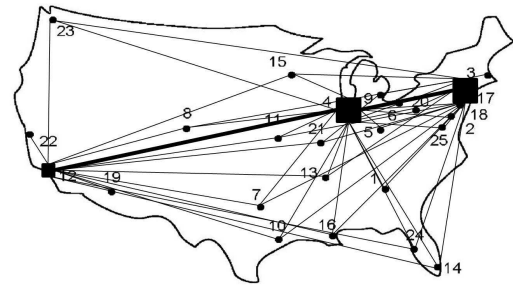
(a) Problem 51: Birinci dönemin sonu.



(b) Problem 51: Beşinci dönemin sonu.



(c) Problem 59: Birinci dönemin sonu.



(d) Problem 59: Beşinci dönemin sonu.

Şekil 4.3: Çok atamalı problem sonuçları.

Şekil 4.2 ve 4.3'te betimlenen problemler ile ADÜ ağlarının planlama çevreni boyunca göstermiş olduğu gelişim takip edilebilir. ADÜ ağlarının zaman içindeki gelişiminden daha önemlisi ise bu çalışmada önerilen çok dönemli planlama

sayesinde ADÜ ağındaki ADÜ ağı tasarımı, atama ve kapasite gibi kararların planlama çevreni boyunca değişebilmesidir.

Problemlerden bazılarında yer seçimi, kapasite, ADÜ ağı tasarımı ya da atama kararlarının planlama çevreni boyunca sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Böyle bir durumda çok dönemli planlamaya ihtiyaç olup olmadığı akla gelebilir. Bir sonraki bölümde bu tip sorulara cevap aranmakta ve çok dönemli planlamanın değeri ölçülmektedir.

5. ÇOK DÖNEMLİ PLANLAMANIN AVANTAJI

Bir önceki bölümde yapılan analizlerde görülebildiği gibi, çok dönemli planlama stratejisi kapsamında geliştirilen matematiksel modeller, küçük boyutlu problemlerin optimal olarak çözülebilmesi için bile, uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Tek boyutlu problemler ile karşılaştırıldığında, çok dönemli planlamada ele alınan problemlere zaman boyutu da eklendiğinden, problemlerin zorluğu artmaktadır. Bu zorluktan kaynaklanan uzun çözüm sürelerine katlanmak ile çok dönemli optimal çözümün getireceği avantaj arasında bir ödünleşim bulunmaktadır. Bu nedenle, çok dönemli planlamanın, tek dönemli planlamayla karşılaştırıldığında avantajlı olup olmadığının bilinmesi yani, çok dönemli planlamanın değerinin ölçülmesi gerekmektedir. Çok dönemli planlamanın değerinin ölçülmesiyle, planlama çevreni boyunca birçok kararın sabit kaldığı problemlerde neden tek yerine çok dönemli planlamanın önerildiği sorusuna da cevap verilebilecektir. Bu motivasyonla, bu bölümde çok dönemli planlamanın değeri önerilen iki farklı ölçüt kullanılarak incelenmektedir. Öncelikle, kullanılan bu ölçütler tanımlanmakta, daha sonra ise kullanılan ölçütlerle elde edilen sonuçlar, çok dönemli problemin optimal çözümleri ile karşılaştırılmaktadır.

Çok dönemli planlamanın değeri kavramı, ilk olarak çok dönemli tersine lojistik ağı tasarımı probleminin ele alındığı Alumur vd. [3] tarafından önerilmiştir. Değer kavramı, çok dönemli problemin optimal amaç fonksiyonu değeri ile aynı problem parametreleri kullanılarak bulunacak tek dönemli bir problemin optimal

çözümünün tüm planlama çevreni boyunca sabitlenmesi ile elde edilen amaç fonksiyonu değeri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Tek dönemli problemin sonucunun planlama çevreni boyunca sabitlenmesi ile elde edilen sonuca *statik problem* veya *statik çözüm* adı verilmektedir. Bu şekilde ifade edilmesinin nedeni ise, çok dönemli probleme ilişkin verilerin ele alınmasına rağmen, tüm kararların planlama çevreni boyunca dönemden döneme değişmemesi, sabit kalmasıdır. Eğer herhangi bir problem için planlama dönemi boyunca değişmeyen (statik) olurlu bir çözüm bulunabilirse, o problem için çok dönemli problemin optimal amaç fonksiyonu değeri ile statik çözümün amaç fonksiyonu değeri arasındaki fark, çok dönemli planlamanın değerini vermektedir.

Bu çalışmada, ADÜ yer seçimi ve ADÜ ağı tasarımı problemleri kapsamında çok dönemli planlamanın değerini ölçmek için iki farklı statik çözüm kullanılmaktadır. Yukarıda tanımlanan statik çözümden kastedilen, çok dönemli veriler kullanılarak planlama çevreninin başından sonuna kadar değiştirilmeden uygulanabilecek (statik) olurlu bir çözüm bulunmasıdır. Önerilen ilk statik çözümü elde edebilmek için problem verileri tek dönemli verilere dönüştürülmektedir. Bunun için, herhangi bir döneme ilişkin verilerin kullanılmasıyla tek dönemli bir problem elde etmek akla ilk gelen yöntem olsa da, ele alınan problem kapasiteli bir problem olduğundan, her dönemde olurlu olabilecek bir statik çözüm bulmak kolay olmamaktadır. Tüm planlama çevreni boyunca uygulanabilecek (olurlu) statik bir çözüm bulunabilmesi için, zamanla değişen problem verileri içinden en büyük değerler seçilerek, zamandan bağımsız tek dönemli problem verileri oluşturulmaktadır. Bu şekilde üretilen tek dönemli problemin optimal çözümünün, tüm planlama çevreni boyunca uygulanması ile statik çözüme ulaşılmaktadır (bu yöntem ilk olarak Alumur vd. [3] tarafından önerilmiştir). Bu şekilde elde edilen statik çözümün amaç fonksiyonu değeri ile çok dönemli problemin optimal amaç fonksiyonu değeri arasındaki fark, *çok dönemli planlamanın zayıf değeri* olarak adlandırılmaktadır.

İlk kez bu çalışmada önerilen ikinci değer kavramı, farklı bir yöntemle elde edilen bir statik çözüm aracılığıyla belirlenmekte ve *çok dönemli planlamanın güçlü değeri* olarak isimlendirilmektedir. Burada kullanılan statik çözümde planlama çevrenine ilişkin verinin tamamı ele alınmaktadır. Zamanla değişen parametreler olan talep ve maliyet parametreleri için herhangi bir kümeleme veya

birleştirme işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu statik çözümü elde edebilmek için geliştirilen matematiksel modellere, planlama çevreni boyunca tasarlanan ağ yapısı ve kapasite ile ilgili kararların değişmeyeceğini belirten kısıtların eklenmesi gerekmektedir. Bu şekilde, problemdeki tüm veriyi kullanabilen statik bir çözüme ulaşılmış olmaktadır. Çok dönemli planlamanın güçlü değeri, zayıf değerde olduğu gibi, statik çözümün amaç fonksiyonu değeri ile çok dönemli problemin optimal amaç fonksiyonu değeri arasındaki fark olarak hesaplanmaktadır.

Yöntemleri yukarıda anlatılan çok dönemli planlamanın zayıf ve güçlü değerleri Tablo 4.3'te listelenen 15 düğümlü problemler arasından yalnızca artan talebin kullanıldığı, 16 problem üzerinde test edilmiştir. Rassal değişen ikinci talep senaryosunun yer aldığı problemler bu analizde kullanılamamıştır, çünkü bu problemler için önerilen yöntemlerle olurlu statik çözümler bulunamamıştır. Bu talep senaryosunda, olurlu bir statik çözüm bulunabilmesi için bir dönemde birden fazla kapasite modülü kurulması gerekmektedir. Bu durumun ele alınan problemin kapasite varsayımlarına uygun olmaması nedeniyle, yapılan analizin sadece artan (Senaryo I) talep senaryosunu kapsamasına karar verilmiştir. Tek ve çok atamalı toplam 16 probleme ilişkin sonuçlar Tablo 5.1'de sunulmaktadır.

Tablo 5.1'de analizi yapılan 16 problemin her biri için sırasıyla, çok dönemli optimal çözüme, zayıf statik çözüme ve güçlü statik çözüme ilişkin sonuçlar gösterilmektedir. Her bir problem için verilen sonuçlar sırasıyla, planlama çevreninin sonunda kurulan ADÜ'lerin yerleri, planlama çevreni boyunca her bir dönemde kurulan ADÜ ağının durumu ve elde edilen toplam maliyet bilgilerinden oluşmaktadır. Ayrıca statik çözümlerin sonuçlarının sunulduğu sütunlarda "Fark" başlığı altında, çok dönemli planlamanın zayıf ve güçlü değerlerini gösteren yüzdelik oranlar da bulunmaktadır. Bu oranlar (5.1) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$Değer = \frac{Statik\ çözümün\ amaç\ fonksiyonu - Optimal\ amaç\ fonksiyonu}{Optimal\ amaç\ fonksiyonu} \times 100 \quad (5.1)$$

Tablo 5.1'de, zayıf statik çözümün sunulduğu sütunlara bakıldığında, 24 nolu

Tablo 5.1: Çok dönemli planlamanın avantajı.

Problem no	Çok dönemli problem				Çok dönemli planlamanın zayıf değeri				Çok dönemli planlamanın güçlü değeri						
	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	Toplam maliyet	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	Toplam maliyet	Fark (%)	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	Toplam maliyet	Fark (%)	ADÜ yerleri	ADÜ ağı durumu (C/I)	Toplam maliyet	Fark (%)
1	1,4,7,12	I-I-I-I	6884,63	1,4,6,7	I-I-I-I	7703,19	11,89	1,4,6,7,12	I-I-I-I	7041,61	2,28	1,4,6,7,12	I-I-I-I	7041,61	2,28
2	1,4,7,12	I-I-I-I	7723,47	1,4,6,7	I-I-I-I	8267,55	7,04	1,4,6,7,12	I-I-I-I	7994,37	3,51	1,4,6,7,12	I-I-I-I	7994,37	3,51
3	4,9,11	C-I-I-I	8287,19	4,6,7,13	I-I-I-I	8782,28	5,97	1,4,6,11	I-I-I-I	8702,49	5,01	1,4,6,11	I-I-I-I	8702,49	5,01
4	4,9,11	C-I-I-I	8571,77	4,9,11,13	I-I-I-I	9168,33	6,96	4,5,9,11	I-I-I-I	9054,01	5,63	4,5,9,11	I-I-I-I	9054,01	5,63
5	1,4,7,12	I-I-I-I	6888,73	4,7	C-C-C-C	7420,72	8,51	1,4,7,12	I-I-I-I	6888,73	0	1,4,7,12	I-I-I-I	6888,73	0
6	4,11,12	I-I-I-I	7585,02	4,11	C-C-C-C	7845,82	3,44	4,11,12	I-I-I-I	7585,02	0	4,11,12	I-I-I-I	7585,02	0
7	4,11	C-C-C-C	7962,85	4,11	C-C-C-C	8040,03	0,97	4,11	C-C-C-C	7962,85	0	4,11	C-C-C-C	7962,85	0
8	4,11	C-C-C-C	8148,96	4,11	C-C-C-C	8234,24	1,05	4,11	C-C-C-C	8148,97	0	4,11	C-C-C-C	8148,97	0
17	4,6,7,12	I-I-I-I	6739,00	5,11,12	I-I-I-I	7156,39	6,19	4,6,7,12	I-I-I-I	6750,75	0,17	4,6,7,12	I-I-I-I	6750,75	0,17
18	4,7,12	I-I-I-I	7336,85	4,6,7	I-I-I-I	7532,75	2,67	4,6,7,12	I-I-I-I	7339,17	0,03	4,6,7,12	I-I-I-I	7339,17	0,03
19	4,7	C-C-C-C	7696,17	4,6,7	I-I-I-I	7765,84	0,91	4,6,7	I-I-I-I	7736,36	0,52	4,6,7	I-I-I-I	7736,36	0,52
20	4,7	C-C-C-C	7760,78	4,6,7	I-I-I-I	7874,50	1,47	4,6,7	I-I-I-I	7874,50	1,47	4,6,7	I-I-I-I	7874,50	1,47
21	1,4,7,12	I-I-I-I	6744,55	4,7	C-C-C-C	7276,14	7,88	1,4,7,12	I-I-I-I	6744,55	0	1,4,7,12	I-I-I-I	6744,55	0
22	4,7,12	I-I-I-I	7292,53	4,7	C-C-C-C	7475,33	2,51	4,7,12	I-I-I-I	7292,53	0	4,7,12	I-I-I-I	7292,53	0
23	4,7	C-C-C-C	7660,70	4,7	C-C-C-C	7760,70	1,31	4,7	C-C-C-C	7660,70	0	4,7	C-C-C-C	7660,70	0
24	4,7	C-C-C-C	7731,79	4,7	C-C-C-C	7731,79	0	4,7	C-C-C-C	7731,79	0	4,7	C-C-C-C	7731,79	0

problem dışındaki diğer tüm problemlerde, toplam maliyetin optimal çok dönemli çözümden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, 16 problemden 12'sinde zayıf statik çözümden ADÜ'lerin farklı düğümlere kurulduğu gözlemlenmektedir. Tek dönemli bir problem çözüldüğünden bazı problemlerde çok dönemli optimal çözümden daha fazla sayıda ADÜ kurulurken, bazılarında ise daha az sayıda ADÜ ile talep karşılanabilmiştir. Ele alınan 16 problemde, elde edilen çok dönemli planlamanın zayıf değeri ortalamada % 4,30 iken en yüksek düzeyde % 11,89 olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, çok dönemli verilerin tek dönemli probleme dönüştürülüp, problemin statik bir şekilde çözülmesi durumunda karar vericinin planlama dönemi boyunca fazladan bir maliyete katlanabileceği görülmektedir.

Tablo 5.1'in sütunlarından güçlü statik çözümün sonuçları incelendiğinde, göze çarpan ilk şey, çok dönemli planlamanın güçlü değerinin, zayıf statik değere göre beklendiği gibi daha az olmasıdır. Burada çok dönemli probleme ait verilerin tamamı kullanıldığı için elde edilen çözümler çok dönemli problemin optimal sonuçlarına daha fazla benzerlik göstermektedir. Analizde yer alan 16 problemden yarısında güçlü statik çözüm, çok dönemli problemin optimal çözümü ile aynı sonuçları elde etmiştir. Bu problemlerin parametrelerinde geniş kapasite kümesi bulunmaktadır ve geniş kapasite kümesindeki modüllerin kapasite miktarlarının diğer kümeye göre nispeten daha büyük olması nedeniyle, bu problemlerde planlama çevreni boyunca sadece bir kez kapasite modülü kurulması yeterli olmuştur. Bu nedenle çok dönemli problem çözümünde bile, planlama çevreni boyunca değişmeyen yer seçimi, ADÜ ağı tasarımı ve kapasite kararları sonucunda, statik bir ağ yapısı ile karşılaşılmaktadır. Çok dönemli optimal çözüm ile güçlü statik çözümün farklı sonuçlar verdiği diğer 8 problemin 7'sinde ise ADÜ'lerin farklı düğümlere kurulduğu görülmektedir. Farklı sonuçlara sahip bu 8 problem için, çok dönemli problemin güçlü değerinin ortalamada % 2,33 en yüksek düzeyde ise % 5,63 olduğu gözlemlenmektedir. Güçlü statik çözümün, optimal çözüm ile aynı sonucu bulduğu diğer 8 problem de ortalamaya katıldığında, çok dönemli planlamanın güçlü değerinin ortalamada % 1,16 olduğu hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan analizde elde edilen bu oran az gibi görünse de, maliyet kalemlerinin gerçek hayattaki değerleri göz önüne alındığında % 1'lik bir

farkın bile karar verici için önemli tasarruflar sağlayabileceği unutulmamalıdır.

Bu bölümde yapılan ve sonuçları Tablo 5.1’de sunulan değer analizi, çok dönemli planlamanın, statik planlamaya oranla planlama çevreni boyunca katlanılan toplam maliyet açısından çok daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Birçok uygulamada stratejik karar verme süreci kapsamında ele alınan ADÜ yer seçimi problemlerine ilişkin sonuçların uzun bir süre boyunca etkili olması beklenmektedir. Bu süre boyunca problem verilerinde yaşanabilecek tüm değişikliklerin problem kapsamında değerlendirilebilmesi için bu tez çalışmasında çok dönemli planlama yaklaşımının ADÜ yer seçimi problemlerinde kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, çok dönemli planlama çevreninde modüler kapasiteli ana dağıtım üssü yer seçimi ve ana dağıtım üssü ağı tasarımı problemi ele alınmıştır. Problemden, planlama çevreni boyunca her dönemde, kurulacak ADÜ'lerin yerleri ve kapasiteleri, talep düğümlerinin hizmet alacakları ADÜ'ler, kurulacak ADÜ'ler arasında işletilecek ADÜ bağlantıları ve talep düğümleri arasındaki akışın rotalanması kararları verilmektedir. ADÜ kurmanın sabit maliyeti, ADÜ bağlantısı işletme maliyeti, ADÜ'ler için kapasite modülü kurma maliyeti, ADÜ'lerde birim akış başına operasyonel maliyet ve ulaşım maliyetinden oluşan toplam maliyetin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Dönemlere bölünmüş sınırlı bir planlama çevreni için planlama yapılmaktadır. Talep hakkında öngörü yapıldığı ve her bir dönemdeki talebin planlama çevreninin başında bilindiği varsayılmaktadır.

Planlama çevreni boyunca her dönemde, farklı bir ADÜ bağlantısı işletilebilmekte, talep düğümlerinin hizmet aldıkları ADÜ'ler değişebilmektedir. Her dönemde ağda yeni ADÜ kurulabilmekte iken mevcut ADÜ'lerin kapatılmasına

izin verilmemektedir. Her dönemde ADÜ'lere en fazla bir kapasite modülü kurulabilmektedir. ADÜ'lerin kapasitesine birleştirme ve transfer akışlarının toplamı dahil edilmektedir. Ağda kurulan bir ADÜ'nün kendi düğümünde başlayan ve biten akışın tamamını birleştirmesi ve dağıtması gerekmektedir. Çok dönemli ADÜ yer seçimi çalışmaları incelendiğinde, ADÜ'ler için kapasite tanımlanması ilk kez bu çalışmada yapılmaktadır. Daha önce çalışılan problemlerde nispeten daha kolay olan kapasitesiz problem ele alınmıştır. Kapasite kullanımı problem zorluğunu artırdığından, bu çalışmada önceki çok dönemli çalışmalara kıyasla daha zor bir problem ele alınmaktadır.

Çalışma kapsamında tek ve çok atamalı durumlar ayrı ayrı incelenmiş, her atama kuralı için karışık tamsayı doğrusal programlama modelleri geliştirilmiştir. Ayrıca, her iki matematiksel model için üç geçerli eşitsizlik kümesi önerilmiştir. Geliştirilen modeller sıfırdan tasarlanacak sistemlerin yanı sıra işletilmekte olan mevcut sistemler için de kullanılabilirlerdir.

Geliştirilen modeller ve önerilen geçerli eşitsizlikler CAB veri kümesinden ele alınan çok dönemli problemler üzerinde test edilmiştir. 15 ve 25 düğümlü ve 5 dönemli test problemlerinde, iki farklı talep senaryosu ve iki kapasite kümesi bulunmaktadır. Toplamda 64 farklı test problemi üretilmiştir. Testler sırasında ticari bir çözücü olan CPLEX 12.4 yazılımı kullanılmıştır. Geçerli eşitsizliklerin performansı 15 düğümlü problemler aracılığıyla ölçülmüştür. Büyük boyutlu problemlerin analizine geçildiğinde matematiksel modellerin 25 düğümlü problemlerin tamamını %1,50 toleransla ortalama 15 saatte çözebildiği gözlemlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda atama ve ADÜ ağı tasarımı kararlarının planlama çevreni boyunca zamanla değiştiği gözlemlenmektedir. Bütün problemlerde ADÜ'ler ilk dönemden itibaren işletilmeye başlanmakta, kapasite modülleri ise en çok ikinci dönemin sonunda kurulmaktadır. Tüm maliyetlerin planlama çevreni boyunca enflasyon oranı ile artması nedeniyle, sonuçlarda yer seçimi ve kapasite kararları planlama çevresinin başlarında verilmektedir. Problemlerde yer alan farklı atama kuralları, talep senaryoları, kapasite kümeleri ve ölçek ekonomisi parametrelerine göre ADÜ yer seçimi kararları farklılık göstermektedir. İncelenen birçok problemde diğer düğümlerden daha fazla akış talebi bulunan Chicago (4),

Los Angeles (12), ve New York (17) gibi düğümlere genellikle ADÜ kurulduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca tüm problemlerde, planlama çevreninin sonunda ADÜ ağının tam serim olmadığı görülmektedir.

Çok dönemli problemler, zaman boyutu ile problem zorluğunun artması nedeniyle tek dönemli problemler ile karşılaştırıldığında çok daha uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle bu uzun çözüm sürelerine katlanılarak elde edilen çok dönemli çözümün değerinin ölçülmesi gerekmektedir. Çok dönemli yaklaşımın değerinin ölçülebilmesi için bu çalışmada çok dönemli planlamanın zayıf değeri ve güçlü değeri olmak üzere iki değer kavramı tanımlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, çok dönemli planlamanın zayıf değerinin ortalama %4,30, en yüksek düzeyde ise %11,89 olduğu, çok dönemli planlamanın güçlü değerinin ise ortalama %2,33, en yüksek düzeyde ise %5,63 olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, çok dönemli planlamanın tek dönemli (statik) planlamaya göre planlama çevreni boyunca katlanılan toplam maliyet açısından çok daha avantajlı olabileceği gösterilmiştir.

Çok dönemli modellerden elde edilen çözüm süreleri göz önüne alındığında, problem için çok daha kısa sürelerde iyi çözümler bulabilecek bir sezgisel algoritmanın gelecekte yapılabilecek en uygun ilerleme olduğu düşünülmektedir. Buna alternatif olarak, daha kısa çözüm sürelerinde problemleri optimal şekilde çözebilecek Bender's ayrıştırma yöntemini kullanan bir kesin çözüm algoritması geliştirilmesi de önerilmektedir. Bunun yanında, matematiksel modellerin ele alabildiği problem büyüklüğünün artırılması yani daha fazla düğüm içeren ve daha fazla döneme sahip problemlerin incelenmesi, modellerin diğer veri kümelerindeki problemler üzerinde de analiz edilmesi gelecekte yapılabilecek diğer çalışmalar arasındadır. Ayrıca, ileriki çalışmalarda, parametrelerdeki belirsizliklerin göz önüne alınabilmesi için problem rassal veya gürbüz eniyileme yöntemleri kullanılarak da modellenebilir.

Kaynakça

- [1] Alumur, S., Kara, B.Y., Network hub location problems: The state of the art. *Computers and Operational Research*, **190**: 1–21, 2008.
- [2] Alumur, S., Kara, B.Y., Karasan, O.E., The design of single allocation incomplete hub networks. *Transportation Research Part B*, **43**: 936–951, 2009.
- [3] Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V., Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, **220**: 67–78, 2012.
- [4] Aykin, T., Lagrangean relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operational Research*, **79** (3): 501–523, 1994.
- [5] Beasley, J.E., OR Library: Hub Location. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/phubinfo.html>, 1990.
- [6] Boland, N., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., Ebery, J., Preprocessing and cutting for multiple allocation hub location problems. *European Journal of Operational Research*, **155**: 638–653, 2004.
- [7] Campbell, J.F., Locating Transportation Terminals To Serve An Expanding Demand. *Transportation Research Part B*, **24**: 173–192, 1990.
- [8] Campbell, J.F., Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, **72** (2): 387–405, 1994b.

- [9] Campbell, J.F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., *Facility Location, Applications and Theory*, chapter Hub Location Problems. Springer, 2002.
- [10] Campbell, J.F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Hub Arc Location Problems: Part I- Introduction and Results. *Management Science*, **51** (10): 1540–1555, 2005a.
- [11] Campbell, J.F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Hub Arc Location Problems: Part II- Formulations and Optimal Algorithms. *Management Science*, **51** (10): 1556–1571, 2005b.
- [12] Campbell, J.F., O’Kelly, M.E., Twenty-Five Years of Hub Location Research. *Transportation Science*, **46** (2): 153–169, 2012.
- [13] Contreras, I., Cordeau, J-F., Laporte, G., The Dynamic Uncapacitated Hub Location Problem. *Transportation Science*, **45** (1): 18–32, 2011.
- [14] Contreras, I., Fernández, E., Marín, A., The Tree of Hubs Location Problem. *European Journal of Operational Research*, **202** (2): 390–400, 2010.
- [15] Cordeau, J-F., Pasin, F., Solomon, M., An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, **144**: 59–82, 2006.
- [16] Correia, I., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels. *Transportation Research Part B*, **44**: 1047–1066, 2010a.
- [17] Correia, I., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., The capacitated single-allocation hub location problem revisited: A note on a classical formulation. *European Journal of Operations Research*, **207**: 92–96, 2010b.
- [18] Correia, I., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Hub and spoke network design with single-assignment, capacity decisions and balancing requirements. *Applied Mathematical Modelling*, **35**: 4841–4851, 2011.
- [19] Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., Boland, N., The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms. *European journal of Operational Research*, **120**: 614–631, 2000.

- [20] Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location Science*, **4**: 139–154, 1996.
- [21] Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of Operations Research*, **86**: 141–159, 1999.
- [22] Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B., Nikbakhsh, E., Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, **64**: 1096–1109, 2013.
- [23] Gelareh, S., Hub Location Models in Public Transport Planning, *Phd Thesis, Vom Fachbereich Mathematik der Technischen Universität Kaiserslautern*, 2008.
- [24] Gelareh, S., Nickel, S., Hub location problems in transportation networks. *Transportation Research Part E*, **47**: 1092–1111, 2011.
- [25] Hamacher, H.W., Labbé, M., Nickel, S., Sonneborn, T., Adapting polyhedral properties from facility to hub location problems. *Discrete Applied Mathematics*, **145**: 104–116, 2004.
- [26] Marín, A., Formulating and solving splittable capacitated multiple allocation hub location problems. *Computers and Operations Research*, **32** (3): 3093–3109, 2005.
- [27] Marín, A., Cánovas, L., Landete, M., New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem. *European journal of Operational Research*, **172**: 274–292, 2006.
- [28] Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers and Operational Research*, **33**: 181–208, 2006.
- [29] Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Facility location and supply chain management a review. *European journal of Operational Research*, **196**: 1–12, 2009.

- [30] Nickel, S., Schöbel, A., Sonneborn, T., *Mathematics Methods and Optimization in Transportation Systems*, chapter Hub Location Problems in Urban Traffic Networks. Springer, 2001.
- [31] O’Kelly, M., Miller, H.J., The hub network design problem: a review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, **3**: 582–593, 1994.
- [32] O’Kelly, M., A quadratic integer problem for the location of interacting hub facilities. *European journal of Operational Research*, **32** (3): 393–404, 1987.
- [33] Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European journal of Operational Research*, **94**: 582–593, 1996.
- [34] Tan, P.Z., Kara, B.Y., A Hub Covering Model for Cargo Delivery Systems. *Networks*, **49**: 28–39, 2007.
- [35] Yaman, H., The hierarchical hub median problem with single assignment. *Transportation Research Part B*, **43**: 643–658, 2009.
- [36] Yoon, M-G., Current, J., The hub location and network design problem with fixed and variable costs: formulation and dual-based solution heuristic. *Operations Research Society*, **59**: 80–89, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : SEÇERDİN, Yusuf
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 03.01.1986 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : +90 505 880 1559
e-mail : yusufsecerdin@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Y. Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013
Lisans	Hacettepe Üniversitesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
Almanca (Başlangıç)

Yayımlar

Dalgıç, Ö.O., Seçerdin Y., Nemutlu G.S., Fescioğlu-Ünver N., Analysis of airport check-in counter allocation policies using simulation. *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling & Applied Simulation (MAS 2012)*, Viyana, Avusturya, 19–21 Eylül, 2012.

Seçerdin, Y., Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Multi-period Hub Location and Hub Network Design Problems with Modular Hub Capacities. *26th European Conference on Operational Research (EURO-INFORMS Joint International Meeting 2013)*, Roma, İtalya, 1–4 Temmuz, 2013.

Seçerdin, Y., Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Çok Dönemli Planlama Çevreninde Modüler Kapasiteli Ana Dağıtım Üssü Yer Seçimi ve Ana Dağıtım Üssü Ağı Tasarımı Problemleri. *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 33. Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 26–28 Haziran, 2013.

Seçerdin, Y., Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Multi-period Hub Location and Hub Network Design Problems with Modular Hub Capacities. *20th European Working Group on Locational Analysis Meeting (EWGLA 2013)*, Ankara, Türkiye, 17–19 Nisan, 2013.