

HAVAYOLU KARGO TAŞIMACILIĞINDA KAPASİTE SINIRI OLMAYAN ÇOK ATAMALI p-ANA DAĞITIM ÜSSÜ MEDYAN PROBLEMİNE TAMSAYILI MODEL YAKLAŞIMI

Asuman ÖZGER *

Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Y.O.,
Eskişehir
asaracoglu@anadolu.edu.tr

Hakan OKTAL

Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Y.O.,
Eskişehir
hoktal@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi: 02 Eylül 2008, *Kabul Tarihi:* 31 Ekim 2008

ÖZET

Topla-dağıtım ağ yapısında, merkezi konumda olan bir tesis, ana dağıtım üssü (ADÜ) olarak hizmet verir. Diğer tesislerden çıkan akışlar ADÜ'de toplanır ve gruplandırılır. Akışların tamamı ya diğer ADÜ'lere, ya da doğrudan varış noktalarına gönderilmek üzere bu merkezden ayrılır. Bu merkezileştirme ve operasyon ağını genişletme ölçek ekonomisinden yararlanma avantajını getirir. Havayolu işletmeleri açısından topla-dağıtım yapısındaki uçuş ağı havayolu işletmelerinin kârını arttırmakta, maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır.

Çalışmada temel olarak ADÜ yerleşim problemlerine yeni boyut kazandırılması amaçlanmıştır. Uçak tiplerinin ve havayolu taşımacılığına ait sektörel özelliklerin ADÜ yerleşimleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Uçakların performansları ve hava taşımacılığının sektörel özelliklerinden yola çıkılarak kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemine yönelik karma tamsayılı doğrusal model geliştirilmiştir. Model GAMS yazılımı kullanılarak kodlanmış çözümde CPLEX çözücü kullanılmıştır. Modellerde kullanılan kısıt ve parametrelerin ADÜ yer seçimi ve atamalarında önemli etkisi olduğu sonucuna varılmıştır

Anahtar Kelimeler: Hava Kargo Taşımacılığı, Topla-Dağıtım Ağ Yapısı, Kapasite Sınırı Olmayan Çok Atamalı p- Ana Dağıtım Üssü Medyan Problemi.

INTEGER MODEL APPROACH FOR UNCAPACITATED MULTIPLE ALLOCATION p-HUB MEDIAN PROBLEM IN AIR CARGO TRANSPORTATION

ABSTRACT

In the hub and spoke network structure, a facility which has the central location serves as a hub. Flows outgoing from other facilities are collected and grouped in the hub. All of the flows depart from this hub either to other hubs or directly to their destinations. This centralization and expansion of operational network provide the benefits of economies of scale. Hub and spoke networks increase the profits and decrease the costs of airlines.

In this study, it is aimed to develop a new aspect about hub location problems. The effects of aircraft types and characteristics of the sector over the hub locations have been investigated. Starting from the characteristics of the air transportation and the aircraft performance mixed integer linear model related with the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem has been developed. Model was coded in GAMS software. CPLEX solver was used. It was found that the constraints and parameters have an important effect on the hub location and allocation.

Key words: Air Cargo Transportation, Hub and Spoke Networks, Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem.

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Topla-dağıtım ağ yapıları; bir ağ yapısı içinde akışların bir merkezi düğüm noktasında toplanması sonrasında gruplandırılarak bu düğüm noktasından dağıtılması prensibine dayalı bir ağ yapısıdır. Bu merkezileştirme ve operasyon ağını genişletme ölçek ekonomisinden yararlanma avantajını getirir [1]. Bunun yanında havayolu şirketleri açısından topla-dağıtım yapısındaki uçuş ağı havayolu işletmelerinin kârını arttırmakta, maliyetlerde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır [2]. Ayrıca farklı sektörlerdeki firmalar, kargo ağı içerisindeki bir ADÜ'nün yakınında durumunda, maliyetlerin azalması yönünden fayda görür [3].

Topla-dağıtım ağ yapısı içerisinde, merkezi tesisin/tesislerin yerinin, bu tesise yönlendirilecek tesislerin ve bunlara bağlı olarak akışların belirlenmesi yöneylem araştırması alanında genel olarak Ana Dağıtım Üssü (ADÜ) yerleşim problemi olarak yer almaktadır.

ADÜ yerleşim problemlerinde üç temel parametre söz konusudur. Bu parametreler;

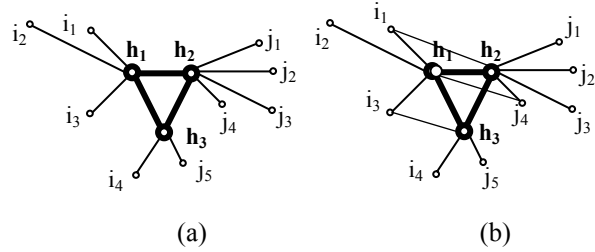
- Düğüm noktaları sayısı
- Düğüm noktaları arasındaki akış trafiği veya talep miktarları
- Düğüm noktaları arasındaki maliyettir.

ADÜ yerleşim problemlerini kısıtlar ve amaç fonksiyonu yönünden 4 farklı şekilde gruplandırmak mümkündür.

- **p-ADÜ medyan problemi;** toplam taşıma maliyetini en küçükleyecek şekilde p sayıda açılacak ana dağıtım üslerinin yerlerini belirleme ve başlangıç-varış noktaları arasındaki trafiğin rotalanması amacıyla düğüm noktalarını bu üslere atama problemidir [4].
- **p-merkez ADÜ problemi;** p-merkez yerleşim problemine benzerdir. Amaç p sayıda açılacak ana dağıtım üslerinin, maksimum seyahat maliyetini en küçükleyecek şekilde yerleşimi ve diğer düğüm noktalarının bu üslere atamalarının yapılması problemidir. Seyahat maliyeti olarak; başlangıç-varış noktaları arasındaki seyahat maliyeti veya her bir bağlantı hattının seyahat maliyeti ele alınabilir [4].
- **ADÜ kapsama problemi;** tüm düğüm noktalarını kapsamak üzere seyahat maliyetinin belirli bir değere eşit veya altında olmasını sağlayacak ve açılacak ADÜ sayısını en küçükleyecek şekilde ana dağıtım üslerinin yerleşimi problemidir [4].
- **Sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemi;** toplam maliyeti en küçükleyecek şekilde ana dağıtım üslerinin sayısını, yerlerini belirleme ve başlangıç-varış noktaları arasındaki trafiğin rotalanması amacıyla düğüm noktalarını bu üslere atama problemidir.

Ana dağıtım üssü yerleşim problemi, iki alt problemi kapsar. Bunlar ADÜ yer seçimi ve düğüm noktalarının belirlenen ADÜ'lere atanmasıdır. Bazı araştırmacılar problemin sadece atama yönünü ele almışlardır. En iyi atamalar ADÜ yer seçimlerinden, en iyi ADÜ yer seçimleri de atama kararlarından etkilenecektir. Dolayısı ile ADÜ ağ yapısı tasarımında yer seçimi ve atama problemleri birlikte ele alınmalıdır [5, 6].

ADÜ yerleşim probleminde tek ve çok atama olmak üzere iki farklı atama yapısı söz konusudur. Tek atamalı yapılarda her düğüm noktasının gelen ve giden trafiği, tek bir ADÜ üzerinden gönderilir ve "tek atamalı ADÜ yerleşimi" olarak isimlendirilir. Çok atamalı yapılarda ise her düğüm noktası, gelen ve giden akışları birden fazla ADÜ üzerinden gönderir veya alır. Bu yapıdaki problemler "çok atamalı ADÜ yerleşimi" olarak isimlendirilir [7]. Şekil 1'de tek atamalı ve çok atamalı ADÜ problemine örnek ağ yapıları görülmektedir. Şekiller üzerinde i, j düğüm noktalarını h ADÜ'leri göstermektedir. Tek atamalı yapıda örneğin i_1 düğümü tek bir ADÜ'ye (h_1) atanırken çok atamalı yapıda i_1 düğümü 1'den fazla ADÜ'ye (h_1 ve h_2) atanmaktadır.



Şekil 1. Tek atamalı ve çok atamalı ADÜ yerleşim problemi örnek ağ yapıları

ADÜ yerleşim problemleri "kapasite sınırı olan" ve "kapasite sınırı olmayan" ADÜ yerleşim problemleri olarak da ayrılır. Kapasite kısıtı sadece ADÜ'nün kapasitesi ile ilgili olabileceği gibi bağlantı hatlarının kapasitesi ile ilgili de olabilir.

ADÜ yerleşim problemlerinde üç kabul söz konusudur:

- Her ADÜ çifti arasında bağlantı vardır.
- ADÜ olmayan talep noktaları arasında doğrudan bağlantıya izin verilmez.
- ADÜ'ler arasında yapılan taşımalarda ölçek ekonomisinden yararlanır ve ADÜ'ler arasındaki birim taşıma maliyetinin hesaplanmasında maliyet azaltma katsayısı (α) kullanılır.

Bazı çalışmalarda sözü edilen kabuller gevşetilmiş olmakla birlikte aksi belirtilmedikçe bu kabuller geçerlidir.

ADÜ yerleşim problemleri kesikli ve sürekli uzaylar için tanımlıdır. Kesikli uzayda talep noktalarının yani

başlangıç-varış noktalarının yeri bellidir. Sürekli uzayda ise talep noktaları koordinat düzleminde herhangi bir noktada tanımlıdır. Çalışmada kesikli ADÜ yerleşim problemleri dikkate alınmıştır ve kısaca “ADÜ yerleşim problemi” şeklinde kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Aşağıdaki bölümde çalışma kapsamında ele alınan kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan ve çok atamalı ADÜ yerleşim problemleri ile havayolu taşımacılığı uygulamaları konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir.

ADÜ yerleşim problemi ilk olarak O’Kelly [8] tarafından ortaya konmuştur. O’Kelly çalışmasında düzlemsel yerleşim problemlerine yönelik model geliştirmiş, ağ yapısında bir ve iki ADÜ bulunan temel modelleri ortaya koymuştur. O’Kelly [8] her başlangıç-varış çifti için doğrudan atamalarla $\binom{n}{2}$ kadar bağlantı hattı kullanılması yerine akışların ana dağıtım üsleri üzerinden gönderilmesi durumunda bunun (n-1)’e düşeceğine dikkat çekmiş ve ADÜ oluşturmada maliyet parametrelerini incelemiştir [8]. Tek atamalı p-ADÜ medyan probleminin ilk modelini O’Kelly [9] geliştirmiştir. Model kareli amaç fonksiyonuna sahip ikil modeldir. Amaç, toplam taşıma maliyetini enküçükmektir [9]. Kareli tamsayı modeli, ADÜ yerleşim problemlerinin temeli olarak kabul edilmektedir.

O’Kelly’nin modelinde N düğümler kümesini, i akışın başlangıç noktasını, j akışın varış noktasını, k potansiyel ADÜ noktasını, p açılacak ADÜ sayısını, W_{ij} i’den j’ye akış miktarını, C_{ij} birim taşıma maliyetini ve $\alpha \in (0,1)$ olmak üzere maliyet azaltma katsayısını göstermektedir. X_{ik} i düğümü k ADÜ’ye atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikil değişkendir. $X_{kk}=1$ olması k düğümünün ADÜ olduğunu, $X_{kk}=0$ olması ise k düğümünün ADÜ olmadığını ifade eder. Buna göre O’Kelly’nin geliştirdiği model aşağıdaki gibidir:

$$\sum_k X_{ik} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_i X_{ik} = p \quad (2)$$

$$X_{ik} \leq X_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (3)$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad (4)$$

kısıtları altında

$$\text{Enk} \sum_{i,j} W_{ij} \left[\sum_k C_{ik} \cdot X_{ik} + \sum_k \alpha \cdot C_{km} \cdot X_{ik} \cdot X_{jm} + \sum_m C_{jm} \cdot X_{jm} \right] \quad (5)$$

(1) ve (4) numaralı kısıtlar her düğümün sadece bir ADÜ’ye atanmasına, (3) kısıtı ise atamaların sadece ana dağıtım üslerine yapılmasına izin verir. ADÜ sayısı, (2) kısıtı ile sınırlandırılmıştır. Amaç fonksiyonu (5), toplam taşıma maliyetini enküçükler [9].

Çalışmaların etkinliğini değerlendirmek amacıyla çoğunlukla CAB (Civil Aeronatics Board) ve AP (Australia Post) verilerinin kullanıldığı görülmektedir. CAB verileri 1970 yılında ABD’de 25 şehrin havayolu yolcu akışı verilerini içermektedir. CAB verileri ilk defa O’Kelly [9] tarafından kullanılmıştır. AP veri kümesi ise Avustralya’da 200 düğüm noktasını kapsayan posta dağıtım hizmetlerine ait verilerdir [10].

Kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemine (UMApHMP: Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem) yönelik doğrusal tamsayı model ise ilk olarak Campbell [11] tarafından geliştirilmiştir. Modelde yukarıda tanımlanan parametre ve karar değişkenleri aynı şekilde kullanılmıştır. Çalışmada, m potansiyel ADÜ noktasını göstermektedir. i-j-k-m arasındaki birim taşıma maliyeti (6) ile belirlenmektedir.

$$C_{ijkm} = C_{ik} + \alpha \cdot C_{km} + C_{mj} \quad (6)$$

Campbell [11] modelde (2), (4) kısıtları yanında aşağıdaki kısıtları ve amaç fonksiyonunu kullanmıştır.

$$\sum_k \sum_m X_{ijkm} = 1 \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$X_{ijkm} \leq X_{kk} \quad \forall i, j, k, m \quad (8)$$

$$X_{ijkm} \leq X_{mm} \quad \forall i, j, k, m \quad (9)$$

$$X_{ijkm} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \quad (10)$$

kısıtları altında

$$\text{Enk} \sum_i \sum_k \sum_m \sum_l W_{ij} \cdot X_{ijkm} \cdot C_{ijkm} \quad (11)$$

(7) kısıtı akışların bir ADÜ çifti üzerinden gönderilmesini sağlar. (8) ve (9) kısıtları akışların ADÜ’ler üzerinden gönderilmesini garantiler. (10) kısıtı ile akış oranı karar değişkeni pozitif değer alır. Amaç fonksiyonu (11) toplam taşıma maliyetini enküçükmektedir. 20 düğümlü ve en fazla 5 ADÜ’lü ağlar için en iyi çözümler sayımlama yöntemi ile bulunmuştur [11].

Campbell [4] bir diğer çalışmasında çok atamalı p-ADÜ medyan probleminde akış eşik değerlerini ve bağlantı hatları için sabit maliyetleri dikkate alan model önermiştir. Campbell [11]’in modeline tamsayı gevşetmesi uygulandığında tamsayı olmayan sonuçlar elde edilmektedir ve çok sayıda kısmi ADÜ ortaya çıkmaktadır. Bunu gidermek amacıyla Skorin-Kapov ve ark. [12] yeni bir karma tamsayı model geliştirmiştir.

O’Kelly ve ark. [13] akışların simetrik olduğu kabulü ve toplam mesafeye göre pratik görünmeyen bazı güzergâhları çıkarmak amacıyla yeni tanımlamalar yaparak, kesin çözüm veren matematiksel model geliştirmiştir.

Skorin-Kapov ve ark. [12]’nin geliştirdiği matematiksel modelde düğüm sayısı arttıkça değişken ve kısıt sayısı kontrol edilemez şekilde büyür. Ernst ve Krishnamoorthy [14] daha az sayıda değişken ile kısıtın yer aldığı model geliştirmiştir. Çalışmada akışların belirlenmesinde, akış oranları değil akış miktarları karar değişkenleri olarak kullanılmıştır [14]. Model hakkında ayrıntılı bilgi 2. Bölümde verilmiştir.

Boland ve ark. Ernst ve Krishnamoorthy [14]’nin modeline yeni kısıtlar ekleyerek bir model ortaya koymuştur [15]. Özellikle alt sınırların belirlenmesinde Ernst ve Krishnamoorthy [14]’nin modeline göre daha zayıf olduğu belirtilmiştir [16].

ADÜ yerleşim problemlerinden biri olan sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemleri de araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu konuda son yıllarda yapılan çalışmaların sayısı artış göstermiştir. p-ADÜ medyan probleminde ADÜ sayısı p ile ifade edilen bir parametre olup, kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemlerinde ise ADÜ sayısı karar değişkeni olarak yer almakta ve çözüm sonucunda bulunmaktadır. O’Kelly [17] sabit maliyetli kapasite sınırı olmayan tek atamalı ADÜ yerleşim problemine (USAHLP: Uncapacitated Single Allocation Hub Location Problem) yönelik kareli tamsayı modeli geliştirmiştir. Çalışma sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemlerinin temeli olarak kabul edilmektedir. Campbell [4] tek/çok atamalı ve kapasite sınırlı/kapasite sınırı olmayan problemler için doğrusal modeller ortaya koymuştur. Aşağıdaki bölümde çalışmanın kapsamı gereği kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemine benzerliğinden dolayı kapasite sınırı olmayan çok atamalı ADÜ yerleşim problemleri (UMAHLP: Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem) konusundaki çalışmalara yer verilmiştir.

Kapasite sınırı olmayan çok atamalı ADÜ yerleşim probleminin çözümüne yönelik olarak Klincewicz [18] dal-sınır algoritması ve eşlenik artışa dayalı algoritma geliştirmiştir.

Mayer ve Wagner [10] dal ve sınır algoritmasına dayalı bir prosedür ortaya koymuş, geliştirdikleri prosedürün Klincewicz [18]’in ortaya koyduğu algoritmaya göre daha iyi çözümler verdiğini vurgulamıştır [10]. Boland ve ark. [15], önışlem teknikleri ve sıkılaştırma kısıtları geliştirmiş, bu sayede problemin daha kısa sürede çözülebildiği belirtilmiştir [15].

Marin ve ark. [19] çok atamalı ADÜ yerleşim problemine yönelik tamsayılı doğrusal modeller ortaya koymuştur. Modelde akışların 1 ya da 2 ADÜ üzerinden gönderildiği kabul edilmiş ve maliyet fonksiyonunun üçgen eşitsizliğini desteklediği prensibi gevşetilmiştir. Bunun yanında problem ön işleme tabii tutularak problemin boyutu küçültülmüştür. Modellerin, önceki modellere göre özellikle orta ve küçük boyutlu ($n \leq 30$) problemlerin çözümünde etkin olduğu vurgulanmıştır [19]. Canovas ve ark [20] eşlenik artış tekniğine dayalı bir sezgisel geliştirmiştir. Camargo ve ark. [21] Benders ayrışım algoritmasını ortaya koymuş, 200 düğümlü problemler için kabul edilebilir süre içerisinde çözüm bulunabildiğini belirtmişlerdir.

Ana dağıtım üssü yerleşim problemleri ile ilgili ayrıntılı bilgiye yakın tarihteki en son yapılan araştırma olan Alumur ve Kara’[16]’nin “Network hub location problems: The state of the art” başlıklı çalışmasından ulaşılabilir.

Topla-dağıtım ağ yapılarının önemli bir uygulama alanı havayolu ile yolcu/kargo ve hızlı paket taşımacılığıdır. Çalışmanın bu bölümünde havayolu yolcu ve kargo taşımacılığı ile hızlı paket taşımacılığı konusunda çalışmalar incelenmiştir.

ADÜ yerleşim problemlerinde kullanılan “talep” veya “akış” terimleri; taşımacılık sektörü uygulamalarında bir şehir çifti arasında uçak, tren, kamyon vb. taşıma araçları ile taşınan yolcu sayısını veya yük miktarını, “düğüm noktaları” ise havaalanları ve terminaller gibi tesisleri ifade etmektedir.

Flynn ve Ratick [22], Essential Air Services programına yönelik bir çalışma yapmıştır. Havayolu ulaşım sisteminde akışların ADÜ’ler üzerinden gönderilmesi kabulünü gevşeterek, maksimum noktaya ulaşımı sağlamak ve havayolu maliyetlerini enküçüklemek amaçlarını kapsayan bir model ortaya koymuştur [22]. Kuby ve Gray [23], Flynn ve Ratick [22]’in çalışmasını geliştirerek “besleyici” ve “duraklama noktalarını” dikkate almıştır. Kuby ve Gray [23] bu sistemde, yük faktörü, ölçek ekonomisi, süre kısıtları ve mesafe arasındaki ilişkileri ele almıştır. Batı Amerika’da paket taşımacılığı yapan Federal Express şirketi için toplam ağ maliyetini enküçükleyen karma tamsayılı model ortaya koymuştur. Federal Express gibi hızlı paket taşımacılığı yapan şirketler büyük ADÜ yanında küçük ya da bölgesel ADÜ’ler de kullanırlar. Bu tip bir topla-dağıtım ağ yapısını Hall [24] modellemiştir. Hall [24] hızlı paket taşımacılığında süre kısıtının ağ tasarımı üzerine etkisini incelemiştir.

Daskin ve Panayotopoulos [25], mevcut bir topla-dağıtım ağ yapısında kârı enbüyükleyecek şekilde güzergâhlara uçak atama modeli ortaya koymuştur. Dobson ve Lederer [26], Daskin ve Panayotopoulos

[25]'un çalışmasını “müşterinin seçimini” de ekleyerek genişletmiştir. Çalışmada bir havayolu şirketinin mevcut bir topla-dağıt ağ yapısında kârını enbüyükleyecek şekilde uçuş çizelgesi ve güzergâh fiyatlarını belirleyen model ortaya konmuştur.

Yukarıda ele alınan çalışmalarda, topla dağıtım ağ yapısı içerisinde yer alan ADÜ'lerin konumları bellidir ve çalışmalarda bu yapılara yeni karakteristikler eklenmiştir. Bununla beraber atamaların ADÜ yer seçimlerinden, ADÜ yer seçimlerinin de atamalardan etkilendiği bilinmektedir. Bunu dikkate alan araştırmacılar ADÜ'lerin sayısı ve konumunun çözümüyle birlikte belirlendiği modeller ortaya koymuştur. Ayrıca ADÜ olmayan düğümler arasında doğrudan bağlantıların kullanımı, ADÜ'leri kurmak için sabit maliyetler, ADÜ'lerde tıkanıklığı azaltmak için kapasite kısıtları, belli bir kullanımın altındaki bağlantı hatlarının açılmasını engelleyen kısıtlar ve ADÜ'ler arasındaki bağlantı hatlarında iyileştirilmiş maliyet fonksiyonlarının kullanılması gibi farklı amaç fonksiyonu, kısıt ve parametrelerin geliştirilmesi ile yeni modeller ortaya konmuştur.

Aykin [1] havayolu ile yolcu taşımacılığına yönelik düğüm noktaları arasında doğrudan bağlantıların, bir ve iki ADÜ'lü 3 farklı topla-dağıtım ağ yapısını incelemiş ve modeller geliştirmiştir. Aykin [1] çalışmada ayrıca sabit maliyetleri kullanmıştır. Aykin [27] bir diğer çalışmada havayolu taşımacılığına yönelik kapasite sınırlı ilk modeli geliştirmiştir.

Marianov ve Serra [28], ADÜ olarak kullanılan havaalanlarında ortaya çıkan tıkanıklık problemini dikkate alan topla-dağıtım ağ yapısı modeli geliştirmiştir.

O'Kelly [29] hızlı paket taşımacılığı için ADÜ'lerin konumlarının belli olmadığı topla-dağıtım ağ yapısında büyük ve küçük ADÜ'lerin kullanıldığı yapıları ele almıştır [29]. Ayrıca O'Kelly ve Bryan [30] taşıma maliyetlerinin akış miktarına bağlı olduğu bir model geliştirmiştir.

Jaillet, Song ve Yu [31], Aykin [1]'in çalışmasını geliştirerek bir topla-dağıtım ağ modeli ortaya koymuştur. Çalışmada, topla-dağıtım ağ yapısının önceliği olmadığı kabulü yapılmıştır.

Sasaki ve ark. [32] havayolu ile yolcu taşımacılığına yönelik tek-duraklı p-ADÜ yer seçimi problemi ortaya koymuştur. Sasaki ve ark. [33] daha önceki çalışmalarına benzer şekilde tek-duraklı çok atamalı p-ADÜ medyan problemi üzerine çalışmıştır. Problem p-medyan problemine benzer şekilde modellenmiştir.

Drezner ve Drezner [34] havayolu taşımacılığında yolcunun kat edeceği toplam mesafeyi enküçükleme amaçlayan tek-duraklı p-ADÜ yerleşim problemi ortaya koymuştur. Çalışmada çekim yasasına göre yeni bir model geliştirilmiştir [34].

Havayolu yolcu taşımacılığında bir başka önemli yön de fiyatların ve rekabet ortamının etkileridir. Fiyatlandırma ve topla-dağıtım ağ yapısı arasındaki ilişki üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Marianov ve ark. [35] havayolu ve kargo taşımacılığına uygulanabilir, rekabet ortamında müşteri kazanma odaklı p-ADÜ yer seçimi ve ataması problemine yönelik model ortaya koymuştur [35].

3. KAPASİTE SINIRI OLMAYAN ÇOK ATAMALI p-ADÜ MEDYAN PROBLEMİ MODELİ

Günümüze kadar ADÜ yerleşim problemi konusunda ulaşılabilen çalışmalarda hava taşımacılığının kendine özgü karakteristiklerinin bu çalışmada dikkate alınan yönü ile değerlendirilmediği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda hava kargo taşımacılığının kendine özgü karakteristikleri dikkate alınarak ana dağıtım üssü yerleşim problemlerinin daha gerçekçi bir yapıya ve tüm havayolu işletmeleri tarafından kullanılabilir bir niteliğe kavuşturulması amaçlanmıştır. Bu sayede hava kargo taşımacılığının daha sağlıklı ve planlı gelişmesi yönünde, katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

Ernst ve Krishnamoorthy [14]'nin geliştirdiği kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemi modeli, hava taşımacılığının sektörel özellikleri dikkate alınarak yeniden düzenlenmiş, bu doğrultuda aşağıda sözü edilen ve doğrudan hava taşımacılığına özgü kısıtların ADÜ seçimini ne ölçüde etkilediği araştırılmıştır. Ayrıca havayolu işletme ve gerekli havaalanı alt yapı maliyetleri dikkate alınarak farklı uçak tiplerinin ADÜ yerleşim problemlerine etkisi ortaya konmuştur.

Çalışmada referans olarak alınan Ernst ve Krishnamoorthy [14]'nin kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemine yönelik geliştirdiği modelde aşağıdaki karar değişkenleri kullanılmıştır.

$$H_k = \begin{cases} 1, & k \text{ düğümü ADÜ olarak belirlenmişse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Y_{kl}^i : i başlangıç noktasından çıkan k ve l ADÜ'leri üzerinden geçen akış miktarı.

Z_{ik} i başlangıç noktasından çıkıp k ADÜ'ye yönelen akış miktarı.

X_{ij}^l : i başlangıç noktasından çıkıp l ADÜ üzerinden geçen ve j noktasına ulaşan akış miktarı.

Modelde O_i i düğümünden çıkan toplam akışı ($O_i = \sum_j W_{ij}$) göstermektedir. $\chi \in (0,1)$ ve

$\delta \in (0,1)$ olmak üzere χ ve δ sırasıyla düğüm-ADÜ ve ADÜ-düğüm arasındaki taşımalarındaki maliyet azaltma

katsayısını, d_{ij} ise i ve j düğümleri arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

Ernst ve Krishnamoorthy [14]'nin geliştirdiği model aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{k \in N} H_k = p \quad (12)$$

$$\sum_{k \in N} Z_{ik} = O_i \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$\sum_{l \in N} X_{lj}^i = W_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (14)$$

$$\sum_{l \in N} Y_{kl}^i + \sum_{j \in N} X_{kj}^i - \sum_{l \in N} Y_{lk}^i - Z_{ik} = 0 \quad \forall i, k \in N \quad (15)$$

$$Z_{ik} \leq O_i \cdot H_k \quad \forall i, k \in N \quad (16)$$

$$X_{lj}^i \leq W_{ij} \cdot H_l \quad \forall i, j, l \in N \quad (17)$$

$$H_k \in \{0,1\} \quad \text{tamsayı ve } \forall k \quad (18)$$

$$X_{lj}^i, Y_{kl}^i, Z_{ik} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \in N \quad (19)$$

kısıtları altında

$$\text{Enk} \sum_{i \in N} \left[\chi \cdot \sum_{k \in N} d_{ik} \cdot Z_{ik} + \alpha \cdot \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} d_{kl} \cdot Y_{kl}^i + \delta \cdot \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} d_{lj} \cdot X_{lj}^i \right] \quad (20)$$

(12) kısıtı, ADÜ sayısının p ile sınırlanmasını sağlamaktadır. (13), (14) ve (15) kısıtları, her i başlangıç noktasının akışlarını gösteren kısıtlardır. (16) kısıtı, ADÜ olmayan bir noktaya akışın yönlendirilmesini engellemektedir. (17) kısıtı ise ADÜ olmayan bir noktadan diğer noktalara akışın dağılmasını engellemektedir. (18) tamsayı kısıtıdır. (19) kısıtı ile akış miktarı karar değişkenlerinin pozitif değer alması sağlanmaktadır. Amaç fonksiyonu (20) toplam taşıma maliyetini enküçüklemektedir. Bu modelle n sayıda 0/1 tamsayı değişkeni olmak üzere $(2n^3+n^2+n)$ değişken, $(4n^2+n+1)$ sayıda kısıt söz konusudur. Problemin boyutu önceki modellere göre azalmıştır.

Aşağıdaki bölümde yeni geliştirilen kısıtlar ve parametreler hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Birim Taşıma Maliyeti

Havayolu taşımacılığına uygulanan ADÜ yerleşim problemi ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda, birim taşıma maliyetlerinin teorik olarak yer aldığı, ancak uygulamalarda veri yetersizliği nedeniyle kullanılmadığı görülmüştür. Diğer alanlardan (telekomünikasyon, posta dağıtımı vb) farklı olarak havacılıkta birim taşıma maliyetlerinin işletmeye, kullanılacak uçak tipine ve her güzergâha göre değişiklik göstermesi, bunun yanında yüksek maliyetli olmasından dolayı, doğru sonuçlara ulaşabilmek açısından birim taşıma maliyetlerinin modelde kullanılmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Çalışmada referans olarak alınan uçak tipleri ve her güzergâh için birim taşıma maliyetleri (c_{ij}) ayrı ayrı belirlenmiş ve modelde kullanılmıştır.

3.2. Alt Yapı Maliyeti

Bir uçağın herhangi bir pistten kalkış-iniş yapabilmesi; uçağın performans karakteristiklerine, ağırlığına, meteorolojik koşullara ve pistin özelliklerine bağlıdır. ADÜ yerleşim problemlerinin uygulandığı telekomünikasyon, posta dağıtımı vb. alanlardan farklı olarak, havayolu taşımacılığında uçakların kalkış-iniş yapacağı havaalanlarının kurulması veya iyileştirilmesi çok yüksek maliyet gerektirmektedir. Bunun yanında ADÜ olarak atanacak havaalanları yoğun olarak kullanılacağından tesislerin bu yoğun trafiği karşılayacak yeterlikte olması gereklidir. Tesisleri yetersiz olan havaalanlarına ek yatırım yapmak gerekecektir. Dolayısıyla, ADÜ yerleşimlerinin ve atamalarının gerçekçi ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için havaalanları ile ilgili ortaya çıkabilecek maliyetlerin dikkate alınması gerektiği görülmüştür. Çalışmada iki önemli maliyet unsuru dikkate alınmıştır. Bunlar uçak tipine göre belirlenen pist maliyeti ve havaalanı kargo terminali için kargo tesisi maliyetidir. Amaç fonksiyonu, havaalanı alt yapı maliyetini de hesaba katacak şekilde aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Burada daha önce tanımlanan parametre ve karar değişkenleri aynı şekilde kullanılmakla birlikte farklı olarak aşağıdaki parametreler eklenmiştir.

R_k : k havaalanının pist maliyeti

KM_k : k havaalanının kargo tesisi maliyeti

olmak üzere amaç fonksiyonu denklem (21)'de verilmiştir.

$$\text{Enk} \sum_{i \in N} \left[\sum_{k \in N} \chi \cdot c_{ik} \cdot d_{ik} \cdot Z_{ik} + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha \cdot c_{kl} \cdot d_{kl} \cdot Y_{kl}^i + \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} \delta \cdot c_{lj} \cdot d_{lj} \cdot X_{lj}^i \right] + \sum_k (R_k + KM_k) \cdot H_k \quad (21)$$

Amaç fonksiyonunun 1. bölümünde taşıma maliyeti, 2. bölümde havaalanının ADÜ olarak belirlenmesi durumunda ortaya çıkabilecek alt yapı maliyeti yer almaktadır. Amaç fonksiyonu (21) toplam maliyeti en küçüklemektedir.

3.3. Menzil Kısıtı

Uçak performans karakteristiği, uçağın belirli koşullar altında beklenen görevi yerine getirebilme kabiliyetidir. Uçakların performans karakteristikleri birbirinden farklılık göstermektedir ve bu karakteristiklerden biri de uçağın menzildir. ADÜ yerleşim problemlerinde mesafe, ADÜ yer seçimleri ve atamalarını belirlemede önemli faktörlerden biridir. Havacılıkta bağlantı hattı olarak uçaklar kullanılması sebebi ile topla-dağıt ağ yapısında uçağın menzilin ADÜ-ADÜ, düğüm-ADÜ ve ADÜ-düğüm arasındaki mesafeden daha fazla olması gereklidir. Bu nedenle menzil kısıtı geliştirilmiştir. u uçak tipini ve S_u u tipi uçağın menzilin göstermek üzere kısıt aşağıdaki gibidir.

$$d_{ik} \cdot H_k \leq S_u \quad (22)$$

(22) kısıtı ile ADÜ yerleşimi ve atamalarında, ADÜ-ADÜ, düğüm-ADÜ ve ADÜ-düğüm noktaları arasındaki mesafenin uçağın menziline göre daha düşük mesafelerde olması sağlanmış olur.

Uçağın menzili; uçak boşken ve tam yüklü iken olmak üzere 2 durum için belirlenir. ADÜ yerleşim problemlerinde amaçlardan biri de özellikle ADÜ'ler arasında yüksek doluluk oranında taşımacılık yapmak olduğundan, uçağın 2 düğüm noktası arasında tam yükü dolu iken uçuşu gerekebilir. Dolayısıyla çalışmada maksimum kalkış ağırlığına göre belirlenmiş olan menzile dikkate alınmıştır.

3.4. Kargo Trafik Süreklilik Kısıtı

Havaalanlarının kargo trafiği verileri incelendiğinde bazı havaalanlarının bazı aylarda yoğun olarak kullanıldığı diğer aylarda ise hiç kullanılmadığı görülür. Buradaki mevcut trafiğin düzensiz ve az olması sebebiyle diğer taşıma modlarına kayma söz konusu olabilir. Bunun yanında bazı havaalanları da trafik talebi yüksek olmasına rağmen yetersiz alt yapıya sahip olmaları sebebiyle kapasitelerinin altında kullanılmaktadır. Yıl içerisinde düzenli trafiği olmayan ve yoğun olarak kullanılmayan ancak ADÜ olmaya aday havaalanlarına yatırım yapmak maliyetin artmasına neden olabilir. Oysa kargo trafiği düzenli ve belirli bir miktarın üzerinde olan ancak alt yapısı yetersiz olan havaalanlarına yatırım yapmak daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu amaçla kargo trafiği sürekliliğini kontrol eden bir kısıt geliştirilmiştir. Daha önce tanımlanan ADÜ karar değişkeni (H_k) aynı şekilde kullanılmıştır. T kargo miktarını, W_a a havaalanının aylık toplam kargo trafiğini ifade etmek üzere kısıt aşağıdaki gibidir:

$$T.H_k \leq W_{a(ay,k)} \quad (23)$$

(23) kısıtı, aylık kargo trafiği belirli bir miktarın altında olan havaalanlarının ADÜ olarak atanmamasını garanti eder. Kısıt, yılın tüm aylarındaki trafiği dikkate alacak şekilde düzenlenmiş olup yılın belli aylarını kapsayacak şekilde de düzenlenmesi mümkündür.

Geliştirilen kısıtlar ADÜ yerleşim problem tiplerinin tümünde uygun şekilde düzenlenerek kullanılabilir. Çalışmada kısıtlar kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan problemine uygulanmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Çok atamalı p-ADÜ medyan problemine yönelik geliştirilen tamsayı doğrusal modelde (12)-(19), (22) ve (23) kısıtları altında (21) amaç fonksiyonu yer almaktadır.

4. HESAPLAMA SONUÇLARI

Çalışmada Türkiye'de kullanılan kargo uçakları arasında en fazla pist uzunluğu gerektiren ve yoğunlukla kullanılan geniş gövdeli uçak kategorisine giren A300-B4 uçağı ile dar gövdeli uçak

kategorisinde yer alan F27-500 tipi kargo uçakları referans alınmıştır. İki farklı uçak tipi seçilmesinin nedeni, uçak tiplerinin farklı kategorilerde yer alması, dolayısıyla gerek pist gereklilikleri gerekse birim taşıma maliyeti yönünden ciddi farklılıklar göstermeleridir. A300-B4, 44 ton yük alabilen bir kargo uçağıdır. F27-500 uçağı ise en fazla 6 ton yük alabilen, maksimum kalkış ağırlığında menzili 700NM ile sınırlı olan bir uçak tipidir. Maliyetlerin bu iki farklı uçak tipine göre hesaplanması ve modellerde kullanılması; ADÜ yer seçimi ve atamalarında uçak tipinin etkisini belirleme ve uçaklar arasında kıyaslama olanağı da sağlamış olur.

Farklı uçak tiplerine göre pistlerin uzunluk, genişlik ve mukavemet yönünden yeterliliklerinin değerlendirilmesinde ICAO (International Civil Aviation Organisation) yayınlarından olan Havaalanı Tasarım El Kitabından yararlanılmıştır [36, 37]. Bununla birlikte pist maliyetlerinin hesaplanmasında DLHİ (Demiryolları Limanlar ve Havaalanları İnşaatı) verileri kullanılmıştır.

Türkiye'deki hava kargo ağının belirlenmesi amacıyla DHMİ (Devlet Hava Meydanları İşletmesi)'nin 2005 yılı istatistik yıllığı incelenmiş ve buna göre kargo taşımacılığında yoğunlukla kullanılan 17 havaalanı belirlenmiştir [38]. Bu havaalanları; İstanbul Atatürk, Ankara Esenboğa, İzmir Adnan Menderes, Antalya, Dalaman, Adana, Trabzon, Bodrum Milas, Çorlu, Diyarbakır, Elazığ, Erzurum, Gaziantep Oğuzeli, Kars, Kayseri, Malatya Erhaç, Van Feritmelin havaalanlarıdır. İstatistik yıllığında yer almayan ancak İstanbul Atatürk Havalimanının yoğunluğunun kaydırılabileceği düşünülerek bu havaalanlarına İstanbul Sabiha Gökçen havaalanı da eklenmiştir.

Günümüze kadar yapılan ADÜ yerleşim problemlerinin havayolu taşımacılığı alanına uygulamalarında, mesafeler öklit kuralına göre hesaplanmıştır. Çalışmada havaalanları arasındaki mesafeler belirlenirken, Türk hava sahası dikkate alınmış ve çok sayıda havayolu şirketi tarafından uçuş mesafesi, uçuş süresi, yüklenmesi gereken yakıt miktarı gibi çok sayıda bilgiyi hesaplamada ve maliyet analizlerini yapmada kullanılan Graflight programı ile aslına uygun şekilde belirlenmiştir.

Havaalanları arasındaki kargo trafiği verileri, Türk Hava Yolları Anonim Ortaklığının 2007 yılında gerçekleşen aylık kargo trafiği istatistiklerinden alınmıştır.

Birim maliyet, bir birim ürün üretmek için sarf edilen maliyet olup, çalışmada birim taşıma maliyetleri, uçuş başına toplam işletme giderinin arz edilen toplam yükün mesafe ile çarpımından elde edilen (ton-mil) değere bölünmesiyle hesaplanmıştır. Havayolu İşletmelerinde toplam işletme gideri; uçak, mürettebat, bakım, sigorta, amortisman, yakıt, yol ücreti ile bilet satış ve reklâm, meydan işletme, yolcu servis ve idari

giderlerin toplamından oluşur ve havayolu şirketine, kullanılan uçak tipine ve güzergâhlara göre farklılık gösterir [39, 40]. Çalışmada toplam işletme giderlerinin hesaplanmasında MNG Hava Kargo İşletmesinin A300-B4 ve F27-500 tipi kargo uçakları için 2007 yılına ait istatistiksel verileri referans alınmış ve buradan hareketle her güzergâh için ayrı ayrı birim taşıma maliyetleri hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan tüm parametreler hakkında ayrıntılı bilgi [41] numaralı kaynaktan edinilebilir.

Geliştirilen karma tamsayı doğrusal karar modeli yapısında olduğundan duyarlılık analizi yöntemleri uygulanamaz. Bu nedenle çalışmanın bu aşamasında ADÜ yerleşim problemlerinde parametrelerin ve modellerin yapısının değişmesi ile birlikte sonuçların nasıl değiştiğini gözlemek amacıyla parametrelerin farklı değerleri ile yeni geliştirilen kısıtlar modele uygulanmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. ADÜ'ler arası maliyet azalma katsayısı $\alpha=0,9$; düğüm-ADÜ, ADÜ-düğüm maliyet azaltma katsayıları (χ ve δ) 1 olarak alınmıştır.

Geliştirilen karma tamsayı doğrusal model GAMS yazılımı kullanılarak programlanmış ve CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür.

Aşağıda öncelikle yıllık akış trafiğinin, alt yapı maliyetlerinin ve birim taşıma maliyetlerinin etkileri incelenmiştir. Ardından menzil ve kargo trafiği süreklilik kısıtlarının ve ADÜ sayısının etkileri ele alınmıştır. Son analizlerde tüm parametre ve kısıtlar birlikte kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 1 ve 2'de sunulmuştur.

4.1. Akış Trafiğinin Etkisi

Tüm başlangıç-varış noktaları arasındaki akış trafiği değerleri sabitken ($W_{ij}=sbt$ ve $W_{ii}=0$); p=2 için Dalaman ve Malatya; p=3 için Dalaman, Esenboğa, Elazığ; p=4 için Dalaman, Erzurum, Malatya ve Sabiha Gökçen havaalanlarının ADÜ olarak belirlenmesi; (Tablo 1 ve 2'de sırasıyla 1, 13 ve 25. analizler) akış trafiğinin göz ardı edildiği durumlarda, ADÜ'lerin mesafelere göre belirlendiğini göstermektedir. Özellikle taşımacılık sektöründe bir güzergâhın açılmasının o iki şehir arasındaki talebe bağlı olduğu düşünüldüğünde, bu tür problemlerde akış trafiğinin göz ardı edilmesinin doğru bir yaklaşım olmayacağı açıkça görülmektedir.

Gerçek akış verilerinin parametre olarak girildiği Tablo 1 ve 2'de sırasıyla 2, 14 ve 26. analizler incelendiğinde ADÜ yerlerinin değiştiği görülmektedir. p=2 için Esenboğa ve Atatürk; p=3 için Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk; p=4 için Adana, Adnan Menderes, Esenboğa ve Atatürk havaalanlarının ADÜ olarak belirlenmesi; ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesinde, kargo akış trafiğinin ve düğümler arasındaki mesafelerin temel belirleyiciler olduğunu göstermektedir.

4.2. Alt Yapı Maliyetlerinin Etkisi

Alt yapı maliyetlerinin çözüm sonuçlarına etkisini gözlemek amacıyla modelin amaç fonksiyonunda değişiklik yapılarak, bir havaalanının ADÜ olması durumunda ortaya çıkabilecek alt yapı maliyetleri hesaba katılmıştır (3, 4, 15, 16, 27 ve 28. analizler). Havaalanı alt yapı maliyetleri A300-B4 ve F27-500 uçakları için ayrı ayrı belirlenmiş ve modele bu şekilde dahil edilmiştir. ADÜ sayısının 2, 3, 4 değerleri için yapılan analiz sonuçlarına göre her iki uçak tipi için de aynı havaalanları ADÜ olarak belirlenmiştir. Bahsi geçen havaalanlarının ADÜ olarak belirlenmesinde ortak yan, belirlenen havaalanlarının ya alt yapı maliyeti gerektirmemesi ya da çok az alt yapı maliyeti gerektirmesidir. p=4 olması durumunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde A300-B4 uçağı kullanıldığında daha yüksek maliyetin ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni ADÜ olarak belirlenen havaalanlarından Adana Havaalanının alt yapı maliyetinin olmasıdır. Dolayısıyla alt yapı maliyetinin toplam maliyeti etkilediği açıkça görülmektedir. Bu da ADÜ problemlerinde alt yapı maliyetlerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

4.3. Birim Taşıma Maliyetlerinin Etkisi

5. ve 6., 17. ve 18., 29. ve 30. analizlerde sırasıyla p=2, p=3 ve p=4 olması durumlarında; amaç fonksiyonunda A300-B4 ve F27-500 uçaklarının birim taşıma maliyetleri kullanılmıştır. Bu analizlere göre ADÜ'lerin yerlerinin değişmediği ancak maliyetin çok farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Örneğin A300-B4 uçağının birim taşıma maliyetlerinin kullanıldığı 5. analizde bulunan toplam maliyet, F27-500 uçağının birim taşıma maliyetlerinin kullanıldığı 6. analizde elde edilen toplam maliyetin 1/4'ü kadardır. Her iki maliyet arasında yaklaşık 4 kat fark vardır. Dolayısıyla topla-dağıt ağ yapısı içerisinde maliyet yönünden karşılaştırma yapıldığında, F27-500 uçağı kargo taşımacılığı için uygun görünmemektedir.

Havayolu Kargo Taşımacılığında Kapasite Sınırı Olmayan Çok Atamalı p-Ana Dağıtım Üssü Medyan Problemine Tamsayılı Model Yaklaşımı

Tablo 1. UMAPHMP Analiz Sonuçları 1

ADÜ S.	Parametre ve Kısıtlar	Uçak tipi	Toplam Maliyet	ADÜ Yerleşimleri
p=2	$W_{ij}=sbt$ d_{ij} $R(k)=0$	-	1450434	Dalaman, Malatya ¹
	W_{ij} d_{ij} $R(k)=0$	-	9430877	Esenboğa, Atatürk ²
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$	A300-B4	9430877	Esenboğa, Atatürk ³
		F27-500	9430877	Esenboğa, Atatürk ⁴
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$	A300-B4	7080939	Esenboğa, Atatürk ⁵
		F27-500	28194300	Esenboğa, Atatürk ⁶
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S	A300-B4	7080939	Esenboğa, Atatürk ⁷
		F27-500	44975940	Adana, Esenboğa ⁸
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} $Wa(ay,i)(2)$	A300-B4	7080939	Esenboğa, Atatürk ⁹
		F27-500	28194300	Esenboğa, Atatürk ¹⁰
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S $Wa(ay,i)(2)$	A300-B4	7080939	Esenboğa, Atatürk ¹¹
		F27-500	44975940	Adana, Esenboğa ¹²
p=3	$W_{ij}=sbt$ d_{ij} $R(k)=0$	-	1318046	Dalaman, Esenboğa, Elazığ ¹³
	W_{ij} d_{ij} $R(k)=0$	-	9162437	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁴
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$	A300-B4	9162437	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁵
		F27-500	9162437	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁶
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij}	A300-B4	6797079	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁷
		F27-500	27295170	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁸
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S	A300-B4	6797079	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ¹⁹
		F27-500	44354090	Adana, Esenboğa, Trabzon ²⁰
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} $Wa(ay,i)(2)$	A300-B4	6796079	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ²¹
		F27-500	27295170	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ²²
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S $Wa(ay,i)(2)$	A300-B4	6797079	Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk ²³
		F27-500	44354090	Adana, Esenboğa, Trabzon ²⁴

Tablo 2. UMApHMP Analiz Sonuçları 2

ADÜ S.	Parametre ve Kısıtlar	Uçak tipi	Toplam Maliyet	ADÜ Yerleşimleri
p=4	$W_{ij}=sbt$ d_{ij} $R(k)=0$	-	1257791	Dalaman, Erzurum, Malatya, Sabiha Gökçen 25
	W_{ij} d_{ij} $R(k)=0$	-	8940920	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 26
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$	A300-B4	9040920	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 27
		F27-500	8940920	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 28
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij}	A300-B4	6716333	Adnan Menderes, Antalya, Esenboğa, Atatürk 29
		F27-500	26672690	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 30
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S	A300-B4	6716333	Adnan Menderes, Antalya, Esenboğa, Atatürk 31
		F27-500	44220110	Adana, Diyarbakır, Esenboğa, Trabzon 32
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} $W_a(ay,i)(2)$	A300-B4	6716333	Adnan Menderes, Antalya, Esenboğa, Atatürk 33
		F27-500	26672690	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 34
	W_{ij} d_{ij} $R(k)$ C_{ij} S $W_a(ay,i)(2)$	A300-B4	6716333	Adnan Menderes, Antalya, Esenboğa, Atatürk 35
		F27-500	26672690	Adana, Adnan Menderes, Esenboğa, Atatürk 36

Analiz sonuçları özellikle maliyet açısından değerlendirmelerde birim taşıma maliyetlerinin kullanılmasının önemini göstermektedir.

4.4. Menzil Kısıtının Etkisi

F27-500 uçağının maksimum yükü taşıyabileceği en uzak mesafe 700NM'dir. Çalışmada menzil kısıtında S_u değeri 700NM olarak kullanılmıştır.

p=2 olması durumunda menzil kısıtının kullanılmadığı 6. analizde Esenboğa ve Atatürk havaalanları ADÜ olarak belirlenirken, menzil kısıtının kullanıldığı 8. analizde Adana ve Esenboğa havaalanları ADÜ olarak belirlenmiştir. Toplam maliyetler de oldukça farklılık göstermiştir. Bu durum ADÜ yer seçimi yapacak bir havayolu şirketinin envanterindeki uçak tipine göre menzil karakteristiğini de değerlendirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. ADÜ sayısının 3 ve 4 olması durumuna göre 20 ve 32 analiz sonuçları elde edilmiştir. Benzer durumlar bu analizler için de gözlenmiştir.

4.5. Kargo Trafik Süreklilik Kısıtının Etkisi

Çalışmada aylık kargo trafiği sınırı her bir havaalanı için 2 ton olarak belirlenmiştir. ADÜ sayısının 2, 3 ve 4 değeri için analizler yapılmış, 9, 10, 21, 22, 32 ve 33 numaralı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre aylık kargo trafiği kısıtının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda aynı havaalanlarının ADÜ olarak belirlendiği görülmüştür (9 ile 5, 10 ile 6, 21 ile 17, 22 ile 18, 32 ile 28, 33 ile 29. analizlerde aynı sonuçlar elde edilmiştir). Bunun nedeni ADÜ olarak belirlenen havaalanlarının 12 aylık kargo trafiğinin düzenli ve belirli miktarın üzerinde olmasıdır. Yani mevcut yıllık ve aylık kargo trafiği akış verileri bu kısıta uygunluk göstermektedir. Farklı verilerle farklı sonuçlar elde edilecektir.

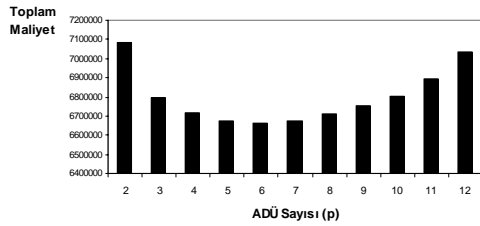
Sonucu analizde tüm kısıtlar, parametreler ve yeni amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Buna göre p=2 için 11 ve 12, p=3 için 23 ve 24, p=4 için 35 ve 36. analiz sonuçları elde edilmiştir.

4.6. ADÜ Sayısının Etkisi

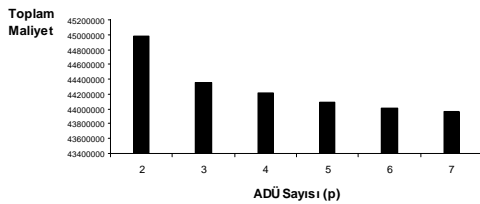
ADÜ sayısının etkisini gözlemleyebilmek amacıyla model, farklı p değerleri için programlanmış ve

çalıştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; A300-B4 uçağı için ADÜ sayısının 2'den 6'ya kadar olan değerlerinde maliyetler giderek azalmakta, 6 ADÜ olması durumunda en düşük değerine ulaşmaktadır. 6'dan daha fazla ADÜ olması durumunda maliyetler tekrar artış göstermektedir. Bu durumda A300-B4 uçağı için ideal ADÜ sayısının 6 olacağı açıktır. Benzer şekilde F27-500 uçağı için p'ye 2'den 7'ye kadar değerler verilmiş ve p=7 değeri için toplam maliyetin minimum değerine ulaştığı görülmüştür. p'ye 7'den yüksek değerler verilmesi durumunda en iyi çözümlere ulaşamamıştır. Buna göre F27-500 uçağı için ideal ADÜ sayısı 7 olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de A300-B4 uçağı Şekil 3'de F27-500 uçağı verilerine göre ADÜ sayısı ve maliyet arasındaki ilişki grafikleri yer almaktadır.

Analiz sonuçlarına göre ideal ADÜ sayısı uçak tipine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu farklılığın menzil kısıtından ve uçakların faydalı yük kapasitelerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan başka, akış trafiğinin sabit olarak kabul edildiği analizler dışındaki tüm sonuçlarda Esenboğa Havaalanının ortak ADÜ olarak yer aldığı görülmektedir.



Şekil 2. A300-B4 uçağı verilerine göre ADÜ sayısı ve maliyet arasındaki ilişki grafiği



Şekil 3. F27-500 uçağı verilerine göre ADÜ sayısı ve maliyet arasındaki ilişki grafiği

5. SONUÇ

Yeni havaalanı yapımı veya alt yapı iyileştirme çalışmaları yanında havayolu işletmeleri için uçak seçimi ve filo planlaması pahalı yatırımlar olup, bu konularda verilecek kararların bilimsel gerekçelere dayandırılması son derece önemlidir. Zira alınan kararlar doğrultusunda yapılacak yatırımların geri dönüşünün kısa sürede olması ve işletmenin başarısı bu kararların ne derece doğru olduğuna bağlıdır. Havayolu işletmesinin kaynaklarını iyi planlaması, geleceğe dönük yatırımlarını da bu doğrultuda

şekillendirmesi gereklidir. Uçuş ağının oluşturulması ve filo planlaması, birlikte ele alınması gereken süreçlerdir. Bu süreçlerin değişen koşullarla birlikte güncellenmesi gerekir.

ADÜ yerleşim problemleri incelendiğinde temel olarak düğümler arası mesafelerin, akış miktarlarının ve birim taşıma maliyetlerinin dikkate alındığı görülmektedir. Ancak özellikle havacılık alanına yapılan uygulamalarda veri yetersizliği nedeniyle birim taşıma maliyetlerinin kullanılmadığı belirlenmiştir. Çalışmada özellikle havacılık sektörü için ADÜ yerleşiminde birim taşıma maliyetlerinin belirleyici temel faktörlerden biri olduğu ve mutlaka kullanılması gerektiği analizlerle ortaya konmuştur.

ADÜ yerleşim problem tipleri incelendiğinde; bu problem tiplerinden sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemlerinde; ADÜ sayısının ve ADÜ'lerin yerlerinin ve atamalarının belirlenmesinde sabit maliyetler olarak alt yapı maliyetlerinin dikkate alındığı, ancak p-ADÜ medyan problemlerinde dikkate alınmadığı görülmektedir. Oysa herhangi bir uçağın bir pistten kalkış-iniş yapabilmesi, pistin uygunluğuna ve yeterliğine bağlıdır. Modelin bir uçağın kalkış-iniş yapamayacağı bir havaalanını ADÜ olarak belirlemesi anlamsız olacaktır. Dolayısıyla alt yapının iyileştirilmesi gerekir ve bu da ek maliyet getirecektir. Çalışmada kapasite sınırı olmayan çok atamalı p-ADÜ medyan tipi problemler için amaç fonksiyonu, pistlerin alt yapı maliyetleri de dikkate alacak şekilde düzenlenmiştir. Yapılan analizlerde alt yapı maliyetinin özellikle toplam maliyeti etkilediği görülmektedir.

Çalışmada, aynı şekilde uçakların menzil gibi bazı performans özelliklerinin ADÜ yer seçimi ve atamalarını etkilediği analiz sonuçlarıyla görülmüştür.

Sonuç olarak, çalışmada hava taşımacılığının dinamikleri dikkate alınarak daha önceki geliştirilmiş modellerin amaç fonksiyonunda yapılan değişiklik ve yeni eklenen kısıtlar ile problemin daha gerçekçi ve havayolu işletmeleri tarafından kullanılabilir bir yapıya dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bir başka deyişle, daha genel nitelik taşıyan ADÜ yerleşim problemi hava taşımacılığı için daha özgün hale getirilmiştir.

Sonraki çalışmalarda:

- Çalışmada ADÜ sayısı kullanıcı tarafından belirlenmiş olup optimum ADÜ sayısının modelin çözümü ile birlikte belirlendiği ADÜ yerleşim problemleri konusunda çalışmalar yapılabilir ve elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılabilir.
- Havaalanı kapasite yetersizliği hava taşımacılığındaki hızlı büyüme sonucunda ortaya çıkan en önemli problemlerden biridir. Bu nedenle

havaalanlarının kapasite sınırı dikkate alınarak ADÜ yerleşim problemlerine yönelik çalışmalar yapılabilir ve sonuçlar değerlendirilebilir.

- Çalışmada kullanılan modelde farklı uçak tiplerine ait parametreler kullanılarak ADÜ yerleşimi ve atamalar üzerine etkileri incelenebilir. Elde edilen sonuçlar neticesinde işletmelerin topla-dağıtım ağ yapısı içinde bir filo tasarımı ya da topla-dağıtım ağ yapısı oluşturma çalışmalarına destek verilebilir.
- Önümüzdeki 20 yıllık süreç için Türkiye'nin nüfus ve kargo verilerinin değişim tahmini yapılarak olası ADÜ yerleşimleri belirlenebilir. Bu konuda ilgili otoritelere referans teşkil edebilecek dokümanlar hazırlanabilir.
- Önerilen modelin karayolu kargo taşımacılığında kamyon filosu planlama ve açılacak ADÜ'lerin kapasitesini belirleme gibi karar verme problemlerine uygulanabilirliği incelenebilir.
- Yapılan çalışmada uçakların menzile, pist gereklilikleri, yük kapasitesi gibi bazı performans karakteristiklerinin ADÜ yerleşimlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre belirli koşullar altında ADÜ yerleşimleri ile uygun uçak tipi farklılık göstermiştir. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak ADÜ yerleşim problemleri ile güzergâhlar arası kullanılacak uçak tipi seçimi problemi birlikte ele alınabilir. Bu probleme yönelik matematiksel model geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Aykın, T., "Networking Policies for Hub-and-Spoke Systems with Application to the Air Transportation System", *Transportation Science*, 29 (3), 1995.
- [2] Bania, N., Bauer, P.W., Zlatoper T.J., "U.S Air Passenger Service: A Taxonomy of Route Networks, Hub Locations, and Competition", *Transportation Research E*, 34 (1), 53-74, 1998.
- [3] O'Kelly, M. E., "A Geographer's Analysis of Hub and Spoke Networks", *Journal of Transport Geography*, 6 (3), 171-186, 1998.
- [4] Campbell, J. F., "Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problem", *European Journal of Operations Research*, 72, 387-405, 1994.
- [5] Daskin, S. M., Network and Discrete Location, John Wiley&Sons Inc., Canada, 1995.
- [6] Bryan, D. L., O'Kelly, M. E., "Hub and Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review", *Journal of Regional Science* 39 (2), 275-295, 1999.
- [7] Campbell, J. F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., "Hub Location Problems", *Facility Location Applications and Theory*, (Ed:Drezner, Z., Hamacher, H.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 373-407, 2004.
- [8] O'Kelly, M. E., "The Location of Interacting Hub Facilities", *Transportation Science*, 20 (2), 92-105, 1986.
- [9] O'Kelly, M. E., "A Quadratic Integer Program For The Location Of Interacting Hub Facilities", *European Journal of Operational Research*, 32, 393-404, 1987.
- [10] Mayer, G., Wagner, B., "Hublocator: An Exact Solution Method For The Multiple Allocation Hub Location Problem", *Computers&Operations Research*, 29, 715-739, 2002.
- [11] Campbell, J. F., "Location and Allocation for Distribution Systems with Transshipments and Transportation Economies of Scale", *Annals of Operations Research*, 40, 77-99, 1992.
- [12] Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., O'Kelly, M. E., "Tight Linear Programming Relaxations of Uncapacitated p-Hub Median Problems", *European Journal of Operational Research*, 94, 582-593, 1996.
- [13] O'Kelly, M. E., Bryan, D. L., Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., "Hub Network Design with Single and Multiple Allocation: A Computational Study", *Location Science*, 4 (3), 125-138, 1996.
- [14] Ernst, A. T., Krishnamoorthy, M., "Exact and Heuristic Algorithms for The Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem", *European Journal of Operational Research*, 104, 100-112, 1998.
- [15] Boland, N., Krishnamoorthy, M., Ernst, A. T., Ebery, J., "Preprocessing and Cutting for Multiple Allocation Hub Location Problems", *European Journal of Operational Research*, 155, 638-653, 2004.
- [16] Alumur, S., Kara Y. B., "Network Hub Location Problems: The State of The Art", *European Journal of Operational Research*, 2007, doi:10.1016/j.ejor.2007.06.008.
- [17] O'Kelly, M., E., "Hub Facility Location with Fixed Costs", *Papers in Regional Science*, 71 (3), 293-306, 1992.
- [18] Klincewicz, J. G., "A Dual Algorithm for the Uncapacitated Hub Location Problem", *Location Science*, 4 (3), 173-184, 1996.
- [19] Marin A., Canovas L., Landete, M., "New Formulations for The Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem", *European Journal of Operational Research*, 172, 274-292, 2006.
- [20] Canovas, L., Garcia S., Marin A., "Solving The Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location

Problem by means of A Dual Ascent Technique”, *European Journal of Operational Research*, 179, 990-1007, 2007.

[21] Camargo, R. S., Miranda G., Luna, H. P., “Benders Decomposition for The Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem”, *Computers&Operations Research*, (2006), doi: 10.1016/j.cor.2006.07.002.

[22] Flynn, J., Ratick, S., “A Multiobjective Hierarchical Covering Model for Essential Air Services Program”, *Transportation Science*, 22 (2), 139-147, 1988.

[23] Kuby, M. E., Gray, R.G., “The Hub Network Design Problem with Stopovers and Feeders: The Case of Federal Express”, *Transportation Research A*, 27 (1), 1-12, 1993.

[24] Hall, R. W., “Configuration of An Overnight Package Air Network” *Transportation Research A*, 23, 139-149, 1989.

[25] Daskin, M. S., Panayotopoulos, N. D., “A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Networks”, *Transportation Science*, 23 (2), 91-99, 1989.

[26] Dobson, G., Lederer, P. J., “Airline Scheduling and Routing in A Hub-and-Spoke System”, *Transportation Science*, 27 (3), 281-297, 1993.

[27] Aykın, T., “Lagrangean Relaxation Based Approaches to Capacitated Hub and Spoke Network Design Problem”, *European Journal of Operational Research*, 79 (3), 501-523, 1994.

[28] Marianov, V., Serra, D., “Location Models For Airline Hubs Behaving As M/D/C Queues”, *Computers&Operations Research*, 30, 983-1003, 2003.

[29] O’Kelly, M. E., “On The Allocation of A Subset of Nodes to A Mini Hub in A Package Delivery Network”, *Papers in Regional Science*, 77 (1), 77-98, 1998.

[30] O’Kelly, M. E., Bryan, D., “Hub Location with Flow Economies of Scale”, *Transportation Research. B*, 32 (8), 605-616, 1998.

[31] Jaillet, P., Song, G., Yu, G., “Airline Network Design and Hub Location Problems”, *Location Science*, 4 (3), 195-212, 1996.

[32] Sasaki, M., Suzuki, A., Drezner, Z., “On The Selection Of Relay Points in a Logistics Systems”, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 14 (1), 39, 1997.

[33] Sasaki, M., Suzuki, A., Drezner, Z., “On The Selection of Hub Airports for An Airline Hub-and-Spoke System”, *Computers&Operations Research*, 26, 1411-1422, 1999.

[34] Drezner, T., Drezner Z., “A Note on Applying The Gravity Rule to The Airline Hub Problem”, *Journal of Regional Science*, 41 (1), 67-73, 2001.

[35] Marianov, V., Serra, D., Revelle, C., “Location of Hubs in A Competitive Environment”, *European Journal of Operational Research*, 114, 363-371, 1999.

[36] ICAO, Areodrome Design Manual Part 1 Runways, Doc. 9157, Part 1, 31.08.2006.

[37] ICAO, Areodrome Design Manual Part 3 Pavements, Doc. 9157, Part 3, 31.08.2006.

[38] DHMİ 2005 İstatistik Yıllığı, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, 2006.

[39] Tsai, W-H., Kuo, L., “Operating Costs and Capacity in The Airline Industry”, *Journal of Air Transport Management*, 10, 271-277, 2004.

[40] Swan, W. M., Adler, N., “Aircraft Trip Cost Parameters: A Function of Stage Length and Seat Capacity”, *Transportation Research Part E*, 42, 105-115, 2006.

[41] Özger, A., Havayolu Kargo Taşımacılığında Ana Dağıtım Üssü Yerleşim Problemine Tamsayı Model Yaklaşımı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2008.

ÖZGEÇMİŞLER

Dr. Asuman ÖZGER

1974 yılında Eskişehir’de doğan Asuman ÖZGER, 1998 yılında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Havacılık Elektrik Elektronik Bölümünden mezun olmuştur. 2001 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Ana Bilim Dalında Uçuş Testleri konusunda hazırladığı tez çalışması ile Yüksek Lisansını tamamlamış, 2008 yılında ADÜ Yerleşim Problemleri konusundaki tez çalışması ile doktora programından mezun olmuştur. Halen Anadolu Üniversitesinde görev yapmaktadır.

Yard. Doç. Dr. Hakan OKTAL

1964 yılında Eskişehir’de doğan Hakan OKTAL Lisans eğitimini 1981-1985 tarihleri arasında İ.T.Ü. Elektrik Elektronik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Bölümünde, Yüksek Lisans eğitimini 1988-1990 tarihleri arasında Fransız Ulusal Sivil Havacılık Okulu (ENAC) Havacılık Teknik İşletmeciliği (Exploitation Aéronautique) Programında, Doktora eğitimini ise 1993-1998 tarihleri arasında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Ana Bilim Dalında tamamlamıştır. Hava Seyrüsefer Sistemleri, Havaalanları Planlaması ve Tasarımı, Sivil Havacılık İşletmeciliği ve Yönetimi üzerine çalışan Hakan

OKTAL, 1988 yılından beri Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu'nda çalışmaktadır. 1998 yılında Yardımcı Doęent Doktor unvanı alan Hakan OKTAL, Ulaştırma Bakanlığı tarafından düzenlenen 9. Ulaştırma Şurası Havayolu Ulaştırması Komisyonunda (1998), 1. Yüksek Havacılık Şurası Türk Havacılığında Uluslararası İlişkiler, Planlama ve Alt Yapı Kullanımı Komisyonunda (1998), DPT tarafından düzenlenen 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı Havayolu Ulaştırması Özel İhtisas Komisyonunda (2001), Başbakanlık Sivil Havacılık İcra Kurulu tarafından düzenlenen Sivil Havacılık Yüksek Kurumu Yasa Tasarısı Hazırlama Komisyonunda (2001) görev almıştır.