

TEK ATAMALI ANA DAĞITIM ÜSSÜ YERLEŞİM PROBLEMİNE YENİ BİR YAKLAŞIM VE HAVA KARGO UYGULAMASI

A NEW APPROACH TO SINGLE ALLOCATION HUB LOCATION PROBLEM AND AN APPLICATION IN THE AIR CARGO TRANSPORTATION

Asuman ÖZGER^{1*}, Hakan OKTAL²

^{1,2}Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, 26470, Eskişehir.
asaracoglu@anadolu.edu.tr, hoktal@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 08.05.2012, Kabul Tarihi/Accepted: 20.06.2012
*Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2013.43043

Özet

Bu çalışmada özellikle hava aracı ve havayolu taşımacılığının sektörel karakteristikleri dikkate alınarak ağ tasarımı problemlerinde kullanılabilecek yeni kısıtlar geliştirilmiştir. Buna paralel olarak, yeni kısıtlar kapasite sınırı olmayan tek atamalı p-ana dağıtım üssü medyan problemi geleneksel modeline eklenmiş ve karma tamsayılı yeni bir model ortaya konmuştur. Çalışmanın amacı yeni kısıtların ana dağıtım üssü yerleşimine etkisini analiz etmektir. Geliştirilen modelin testi hava kargo taşımacılık istatistikleri ile A300-B4 ve F27-500 uçaklarına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda geliştirilen yeni kısıtların ve kullanılan uçak tipinin ana dağıtım üssü yer seçimlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Ana dağıtım üssü, Ana dağıtım üssü yerleşim problemi, Karma tamsayılı matematiksel model, Havayolu kargo taşımacılığı.

Abstract

In this study, the new constraints which can be applied in network design problem are developed by taking especially the sectoral features of air transportation and aircraft types into consideration. A new mixed integer linear programming model is developed by including the new constraints into the traditional model of uncapacitated single allocation p-hub median problem accordingly. The aim of this study is to analyze the effects of the new constraints on the hub location. The model is tested by using Turkish air cargo statistics and the data related to the aircraft types, A300-B4 and F27-500. The results of the analysis show that the new constraints and the aircraft types used in air cargo transportation have the significant effects on the hub location problem.

Keywords: Hub, Hub location problem, Mixed integer mathematical model, Air cargo transportation.

1 Giriş

Her düğüm noktasına doğrudan bağlantı kurmak yerine daha az sayıda bağlantı ile tüm düğümleri bir ya da birden fazla Ana Dağıtım Üssü (ADÜ) üzerinden birbirine bağlayan ana dağıtım üssü ağ yapısı çok sayıda havayolu işletmesi tarafından tercih edilmektedir. ADÜ'lerin yerlerinin belirlenmesi ve diğer düğümler ile belirlenen ADÜ'ler arasındaki atamaların tespit edilmesi Ana Dağıtım Üssü Yerleşim Problemi (AYP) olarak adlandırılır. AYP'nin farklı türleri mevcuttur. Bunlardan biri olan p-ADÜ Medyan Problemi (p-ADÜMP) modelinde amaç, maliyeti en küçükleyerek belirli bir sayıda (p) ADÜ'nün yerleşimlerini ve atamalarını belirlemektir. Bu kapsamda geleneksel p-ADÜMP modelinde ADÜ yerleşimleri ve atamaları, temel olarak 5 parametre referans alınarak belirlenir. Bu parametreler; ağ sisteminde bulunan düğümler arasındaki trafik miktarı, düğümler arası birim taşıma maliyeti, düğümler arası mesafe, açılacak ADÜ sayısı (p) ve maliyet azaltma katsayısıdır. Açılacak ADÜ sayısı kullanıcı tarafından belirlenen bir parametredir. Maliyet azaltma katsayısı ADÜ'ler arasında yüksek oranda taşıma olacağı ve bu nedenle birim taşıma maliyetinin düşeceği ölçek ekonomisi yaklaşımından hareketle ortaya çıkan 0 ile 1 arasında değişen bir katsayıdır.

ADÜ Yerleşim Problem tipleri her biri kendi içinde tek atamalı ve çok atamalı olmak üzere sınıflandırılır. Tek atamalı yapılarda her düğüm noktasının gelen ve giden trafiği tek bir ADÜ üzerinden, çok atamalı yapılarda ise her düğüm noktasının gelen ve giden trafiği birden fazla ADÜ üzerinden gönderilir veya alınır. Bu yapıdaki problemler sırasıyla tek

atamalı ADÜ yerleşim problemi (AYP/TA) ve çok atamalı ADÜ yerleşim problemi (AYP/ÇA) olarak adlandırılır. AYP ile ilgili sınıflandırma Campbell, (1996) tarafından yapılmıştır [1].

ADÜ yerleşim problemi ilk olarak O'Kelly (1986) tarafından ortaya konmuştur [2]. O'Kelly (1987) çalışmasında tek atamalı p-ADÜMP ve problemin kareli tamsayı modelini geliştirmiştir [3]. Bu model ADÜ yerleşim problemlerinin temel modeli olarak kabul edilmektedir. Aynı problemin ilk tamsayılı doğrusal programlama modeli ise Campbell, (1994) tarafından ortaya konmuştur [4]. Skorin-Kapov v.d., (1996), O'Kelly ve ark. (1996), Sohn ve Park (1998), Ernst ve Krishnamoorthy (1996), Ebery (2001) programlama modeli üzerinde çalışmalar yapmıştır [5]-[9]. Konu ile ilgili literatür çalışması Alumur ve Kara, (2008) ile Hekmatfar ve Pishvae, (2009) tarafından yapılmıştır [10]-[11].

Havayolu taşımacılığı, AYP'nin uygulandığı önemli alanlardan biridir. Konu ile ilgili literatür çalışması Bryan ve O'Kelly (1999), tarafından yapılmış olup bu bölümde 2000 yılı sonrası çalışmalara yer verilmiştir [12]. İlgili literatür incelendiğinde ADÜ ağının havayolu taşımacılığı uygulamalarında uçak rotalama, çizelgeleme ve filo atama problemlerinde ele alındığı görülmektedir. Brueckner, (2002), Yan v.d., (2006), Yan v.d., (2008) ve Yang, (2009)'ın çalışmaları buna örnek olarak verilebilir [13]-[16]. Havayolu işletmelerinde farklı ağ tasarımlarının etkilerini gözlemlemek amacıyla çalışmalar da yapılmıştır. Havayolu işletmelerinin ağ tasarımı üzerine yapılan çalışmalar arasında Hsu ve Wen (2000) ile Lin v.d., (2003) yer almaktadır [17]-[18]. Bunun yanında ilgili literatürde birden fazla havayolu işletmesinin rekabet ettiği ADÜ ağ yapısının incelendiği çalışmalar da

mevcuttur. Bu tip problemlerde amaç işletmenin kârını ya da müşteri sayısını enbüyüklemektir. Marianaov v.d., (1999), Adler ve Berechman, (2001), Eiselt ve Marianov, (2009)'ın çalışmaları buna örnek olarak verilebilir [19]-[21]. Literatürde oyun kuramının ADÜ ağ yapısına uygulandığı çalışmalar da ayrıca göze çarpmaktadır. Barla ve Constantatos, (2003), Martin ve Roman, (2003;2004) ile Adler ve Smilowitz, (2007), Aguirregabiria ve Ho, (2010) bu çalışmalar arasında sayılabilir [22]-[26]. Talep tahmini ve AYP'nin birlikte ele alındığı çalışmalara örnek olarak Adler ve Hashai, (2005) ile Huang ve Wang, (2009)'ın çalışmaları örnek olarak verilebilir [27]-[28]. Tıkanıklık ADÜ ağ yapılarında önemli bir sorundur. Literatürde AYP'yi tıkanıklık yönüyle de ele alan çalışmalar yer almaktadır. Marianaov ve Serra, (2003), Elhedhli ve Hu (2005), Camargo v.d., (2009) örnek çalışmalar olarak verilebilir [29]-[31]. Bağlantıların kapasite sınırı AYP'de ele alınan bir diğer konudur. Lin v.d., (2012)'nin çalışması buna örnek gösterilebilir [32].

Yukarıda sözü edilen havayolu uygulamalarında AYP'nin farklı versiyonları kullanılmıştır. Aşağıdaki bölümde havayolu taşımacılığı üzerine 2000 yılı sonrası yapılan p-ADÜMP ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

Adler ve Hashai, (2005) Orta Doğu Bölgesi için havayolu taşımacılığında bölgelerarası yolcu talep tahmini ve ADÜ yer seçimlerini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmıştır [27]. Araştırmacılar çalışmada yolcu talep tahmini sonuçlarını p-ADÜMP'nin girdileri olarak kullanmıştır. Elhedhli ve Hu (2005) topla-dağıt ağ yapısında tıkanıklık faktörünü dikkate alan bir çalışma yapmıştır [30]. Çalışmada tıkanıklık faktörünün p-ADÜMP'ye getireceği etki için amaç fonksiyonuna doğrusal olmayan maliyet faktörü eklenmiştir. Adler ve Smilowitz, (2007) rekabet ortamında havayolu şirketlerinin birleşme ve işbirliklerinin analizini amaçlayan bir çalışma yapmıştır [25]. Çalışmada oyun teorisi kapsamında işletmenin kârını en büyüleyecek şekilde p-ADÜMP modeli geliştirilmiştir. Huang ve Wang, (2009) maliyet ve talepteki belirsizliklerin havayolu işletmelerinin ağ yapısını etkileyeceğini öngörmüştür [28]. Araştırmacılar, bu etkilerin sebep olacağı risklerin azaltılması için maliyet ve talepteki belirsizlikleri de dikkate alan çok amaçlı p-ADÜMP formülasyonu ve genetik algoritmaya dayalı bir çözüm algoritması geliştirmiştir. Menou v.d., (2010) çok modlu kargo taşımacılığında Moroccan havaalanı dışında ADÜ olarak kullanılacak alternatif havaalanlarının değerlendirildiği bir çalışma yapmıştır [33]. Bu tür bir merkez seçiminde sosyoekonomik faktörler, coğrafik konum ve çevresel etkiler rol oynar. Bu kriterlerden bazıları sayısal olarak ifade edilebilirken bazılarını sayısal olarak ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle çalışmada stokastik çok kriterli uygunluk analizi kullanılmış, her bir kriter için farklı analizler yapılmıştır. Kriterlerden biri de ADÜ yerleşimi ve atamalarıdır. Bunun için p-ADÜMP modeli kullanılmış ve tanımlanan tüm kriterler birlikte değerlendirilerek alternatif havaalanları belirlenmiştir. Lin v.d., (2012) bağlantıların kapasitesinin sınırlı olduğundan yola çıkarak kapasite sınırı olan p-ADÜMP modeli ve modelin çözümü için bir algoritma geliştirmiştir [32]. Araştırmacılar çalışmada hava kargo uygulaması sunmuştur.

Çalışmanın amacı özellikle havayolu taşımacılığına ait karakteristیکler dikkate alınarak geliştirilen, diğer taşımacılık modlarına da uygulanabilecek yeni kısıtların ana dağıtım üssü yerleşimi problemine etkisini araştırmaktır. Bu doğrultuda geleneksel tek atamalı p-ADÜMP modeline yeni kısıtlar eklenmiş ve yeni karma tamsayı bir model geliştirilmiştir.

Alumur ve Kara, (2008) çözüm süresi yönünden en iyi modelin, Ernst ve Krishnamoorthy, (1996)'nın geliştirdiği matematiksel model olduğunu belirtmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada Ernst ve Krishnamoorthy, (1996)'nin modeli kullanılmıştır. Model sonraki bölümlerde kısaca "EK Modeli" olarak isimlendirilmiştir. EK Modeline kısıtlar eklenerek geliştirilen yeni karma tamsayı model ise çalışmanın sonraki bölümlerinde kısaca "Yeni Model" olarak adlandırılmıştır. Modelin uygulaması hava kargo taşımacılığı alanında Türkiye'de faaliyet gösteren iki havayolu işletmesinin verileri kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmanın 2. bölümünde matematiksel modele, 3. bölümünde ise veriler ile ilgili açıklamalara yer verilmiştir. 4. bölümde hesaplama sonuçları, 5. bölümde sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2 Matematiksel Model

p-ADÜMP, p sayıda ADÜ'nün yerleşimi ve atamaları problemi olup tek atamalı p-ADÜMP'de her bir düğüm sadece bir ADÜ'ye atanır. Problemin temel şartlarından biri, ADÜ olmayan düğümler arasında bağlantı yapılamamasıdır. Diğer temel koşul ise tüm ADÜ'ler arasında bağlantı olması zorunluluğudur. Bu kapsamda çalışmada kullanılan *EK Modeli'ne* ait tanımlamalar aşağıdaki gibidir.

Küme

N : Ağ yapısında bulunan düğümler kümesi
 \mathcal{I} : İndisler

i : Trafiğin başlangıç noktası $i \in N$

j : Trafiğin varış noktası $j \in N$

k : Potansiyel ADÜ noktası $k \in N$

l : Potansiyel ADÜ noktası $l \in N$

Parametreler

W_{ij} : i 'den j 'ye trafik miktarı

C_{ij} : i 'den j 'ye birim sefer maliyeti

d_{ij} : i 'den j 'ye mesafe

α : ADÜ'ler arasındaki taşımalardaki maliyet azaltma katsayısı $\alpha \in (0,1)$

p : Açılacak ADÜ sayısı

O_i : i düğümünden çıkan toplam akış miktarı

$$(O_i = \sum_j W_{ij})$$

D_i : i düğümüne gelen toplam akış miktarı

$$(D_i = \sum_j W_{ji})$$

Karar değişkenleri

$$X_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümü ADÜ } k \text{'ya atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$X_{kl} = \begin{cases} 1, & k \text{ düğümü ADÜ olarak atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Y_{kl}^i : i düğümünden çıkarak k ve l ADÜ'lerinden geçen akış miktarı

Yukarıdaki tanımlamalara göre EK Modeli küçük notasyon değişiklikleri ile aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$nk \sum_i \sum_k d_{ik} C_{ik} X_{ik} (O_i + D_i) + \sum_i \sum_k \sum_l \alpha d_{kl} C_{kl} Y_{kl}^i \quad (1)$$

$$\sum_k X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_k X_{kk} = p \quad (3)$$

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

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad (5)$$

$$\sum_i Y_{kl}^i - \sum_l Y_{lk}^i = O_i X_{ik} - \sum_j W_{ij} X_{jk} \quad \forall i, k \in N \quad (6)$$

$$Y_{kl}^i \geq 0 \quad \forall i, k, l \in N \quad (7)$$

Amaç fonksiyonu (1) düğüm-ADÜ ve ADÜ'ler arası taşıma maliyetleri olmak üzere iki maliyet kaleminden oluşmakta ve toplam taşıma maliyetini enküçükmektedir. Havayolu taşımacılığında mesafeden bağımsız sabit maliyetlerin (uçak kiralama/sahiplik ve sigorta bedelleri, personel maaşları vb.) yüksek olmasından dolayı düğümler arasındaki uçuş mesafesi ve taşınan yük miktarı arttıkça birim taşıma maliyeti azalır. Bununla birlikte her havaalanı çifti (i-j) arasında ortaya çıkan maliyet doğrusal değildir ve farklılık gösterir. Bu nedenle çalışmada *EK Modelinde* yer alan birim taşıma maliyeti yerine i'den j'ye "birim sefer maliyeti" (Cij) kullanılmıştır. (2) ve (5) numaralı kısıtlar her düğümün sadece bir ADÜ'ye atanmasını, (4) kısıtı ise sadece düğümler ile ana dağıtım üsleri arasında atama yapılmasını sağlar. Bu kısıt ile problemin temel koşullarından biri olan düğüm-ADÜ bağlantıları gerçekleşmiş, ADÜ olmayan düğümler arasındaki bağlantılar ise engellenmiştir. Açılacak ADÜ sayısı, (3) kısıtı ile sınırlandırılmıştır. (6) kısıtı akış dengeleme kısıtıdır. Bu kısıt ile tüm düğümlerin ADÜ'ler üzerinden gönderilen ve alınan toplam trafiklerinin, düğümlerin gelen ve giden toplam trafiğine eşitliği kontrolü sağlanır. (7) kısıtı i düğümünden çıkarak ADÜ k ve l'den geçen akış miktarı değişkeninin (Y_{kl}^i) 0'dan büyük pozitif değer almasını sağlar.

Bu çalışmada yer alan ve aşağıda açıklanan yeni kısıtlar; havayolu taşımacılığının karakteristikleri dikkate alınarak geliştirilmiş olmasına rağmen, telekomünikasyon, karayolu, demiryolu, denizyolu taşımacılığı gibi diğer alanların AYP modellerine de uygulanabilir. Dolayısıyla bu bölümde, geliştirilen kısıtlar genel olarak açıklanmıştır. Yeni kısıtlarda kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir.

S : Maksimum taşıma mesafesi,

T : Belirli bir zaman aralığındaki minimum trafik miktarı,

W_{ak} : k düğümünün belirli bir zaman aralığındaki toplam akış miktarı,

$$RA_k = \begin{cases} 1, k \text{ düğümü ADÜ olmak için yeterli ise} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Çalışmada geliştirilen yeni kısıtlar aşağıdaki gibidir:

$$d_{ik} X_{ik} \leq S \quad \forall i, k \in N \quad (8)$$

$$X_{kk} \leq RA_k \quad \forall k \in N \quad (9)$$

$$TX_{kk} \leq W_{ak} \quad \forall k \in N \quad (10)$$

(8) kısıtı, ADÜ k 'ya atanan i düğümü ile ADÜ k arasındaki mesafenin, maksimum taşıma mesafesinden daha düşük olmasını garantiler. Bu kısıt ile düğüm-ADÜ arasındaki mesafenin belli bir değeri aşması engellenmiştir. (9) kısıtı ADÜ olması için yeterli niteliklere sahip olmayan, (10) kısıtı ise belli bir değer altında trafiği olan düğümlerin ADÜ olmasını engeller. Bu iki kısıt ile uygulama alanlarına bağlı olarak düğümlerin ADÜ olmaya uygunluk ve yeterlilikleri değerlendirilir. Çalışmada geliştirilen *Yeni Model*, (2-10) kısıtları altında (1) amaç fonksiyonunu içermektedir. Yeni

geliştirilen kısıtların havayolu taşımacılığına uyarlanmış hali sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

3 Veri

Havayolu ile kargo taşımacılığı, dünyada ve Türkiye'de her geçen yıl hızla büyümesine rağmen Türkiye'de diğer taşıma modlarına göre taşımacılık sektöründeki payı halen beklentilerin altındadır. Dünya hava kargo trafiğinin önümüzdeki 20 yıl içerisinde yıllık ortalama yüzde 5,9 oranında büyüme hızı ile büyüyeceği öngörülmektedir [34]. Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nin verilerine göre Türkiye'de son on yılda yük trafiğinde yaklaşık üç katı artış olduğu gözlenmiştir. Bu durum Türkiye'nin havayolu kargo taşımacılığı piyasasında büyüme hızının dünya genelindeki artıştan daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında ADÜ yerleşim problemlerinde kullanılabilecek yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur. Söz konusu veri kümesi; havaalanları arasındaki yıllık hava kargo trafiğini, mesafeleri ve iki farklı uçak tipi için birim sefer maliyetlerini içermektedir. Birim sefer maliyeti, (i-j) arasındaki sefer maliyetinin faydalı yüke bölünmesi ile elde edilmiştir. Tüm veriler tek bir havayolu işletmesinden temin edilememiş, 2 farklı havayolu işletmesinden sağlanmıştır. Hava kargo trafiği akışları Türk Havayolları (THY) A.O.'nın 2006 yılı yurt içi kargo trafiği istatistiklerinden, birim sefer maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan veriler ise MNG Hava Kargo İşletmesi'nin 2006 yılına ait istatistiklerinden elde edilmiştir. THY A.O. hava kargo ve yolcu taşımacılığı, MNG Hava Kargo İşletmesi ise sadece hava kargo taşımacılığı yapan işletmelerdir. THY A.O. hava kargonun büyük bir kısmını yolcu uçaklarının altındaki kargo bölümünde taşımaktadır. 2006 yılına ait THY A. O. istatistiklerine göre hava kargo taşımacılığı 18 havaalanı arasında gerçekleşmiştir. Tablo 1'de THY A.O.'nın illere göre 2006 yılına ait toplam kargo trafiği verileri sunulmuştur. THY A.O.'nın 2006 yılı yurt içi kargo istatistiklerine göre taşımının % 96'sı Türkiye'de gelişmiş altı ilde yoğunlaşmıştır. Bu iller Türkiye'nin altı farklı bölgesinde yer almaktadır.

Tablo 1: THY A.O. 2006 yılı kargo trafiği istatistikleri.

Havalimanı/Havaalanı İsmi	IATA Kodu	Yıllık Kargo Trafiği (ton)
ISTANBUL ATATURK	IST	31.155
IZMIR ADNAN MENDERES	ADB	12.241
ANKARA ESENBAGA	ESB	8.802
ADANA	ADA	5.096
ANTALYA	AYT	3.545
TRABZON	TZX	1.402
DALAMAN	DLM	439
GAZIANTEP	GZT	359
DIYARBAKIR	DIY	327
ISTANBUL SABIHA GOKCEN	SAW	321
MILAS-BODRUM	BJV	265
KAYSERI	ASR	225
MALATYA ERHAC	MLX	223
ERZURUM	ERZ	182
VAN FERIT MELEN	VAN	148
DENİZLİ ÇARDAK	DNZ	52
KARS	KSY	47
ELAZIĞ	EZS	28

Çalışmanın amacı tek tip uçak kullanımının geçerliliğini sınamaktan çok, farklı uçak tiplerinin ve bu çalışmada tanımlanan kısıtların toplam maliyeti ve dolayısıyla ağ tasarımı ne ölçüde etkilediğini ortaya koymaktır. Bu nedenle çalışmada tüm kargonun tek tip uçak ile taşındığı varsayılmış ve F27-500 ve A300-B4 kargo uçaklarına ait sefer maliyeti ve performans verileri kullanılmıştır. MNG Hava Kargo İşletmesi'nden alınan veriler ve bu verilere göre her iki uçak tipi için hesaplanan birim sefer maliyetleri şirketin gizlilik politikası gereği çalışmada sunulmamıştır.

Havayolu taşımacılığında herhangi iki düğüm arasında taşımacılık yapacak bir uçağın bu iki düğüm arasındaki mesafeden daha düşük bir menzile sahip olması ve bu durumun dikkate alınmadan bir ağ tasarımı yapılması elde edilen sonucun doğruluğunu olumsuz yönde etkiler. Çalışmada p-ADÜMP için geliştirilen "maksimum taşıma mesafesi kısıtı (8)", havayolu taşımacılığı kapsamında uçakların menzili (S) olarak ele alınmıştır. F27-500 uçağının menzili 700NM, A300-B4 uçağının menzili ise 2900NM'dir [35]-[36].

Havayolu taşımacılığında bir uçağın bir havaalanından diğerine taşımacılık yapabilmesi her şeyden önce uçağın kalkış/iniş yapacağı pistlerin yeterli olmasına bağlıdır. Pistin yeterliliği pistin boyutları, kaplaması gibi özellikleri ile uçağın karakteristiklerine ve meteorolojik koşullara bağlıdır. ADÜ ağ tasarımlarında havaalanı pisti, ilgili uçağın kalkışı ya da inişi için yeterli nitelikte değilse o havaalanını ADÜ olarak belirlemek operasyonlar sırasında öngörülmeleyen yüksek maliyetlere sebep olabilir. Bu nedenle çalışmada "düğümün ADÜ olma uygunluk kısıtı (9)", uçakların maksimum kalkış ağırlığı ile kalkış/iniş yapabilmesi için pist uygunluğu olarak ele alınmıştır. Çalışmada her iki uçak tipinin ilgili pistlerden kalkış ve iniş için gerekli niteliklere sahip olup olmadığı incelenmiştir. Modelde düğümün ADÜ olma uygunluk parametresi (RAK); ilgili uçağın kalkış ve inişi için pist yeterli ise "1" yeterli değilse "0" olarak alınmıştır. Havaalanı pistlerinin uygunluğu uçaklara ait Uçuş El Kitapları (AFM: Airplane Flight Manual) ve Havaalanı Tasarım El Kitabı (ADM: Aerodrome Design Manual) dikkate alınarak belirlenmiştir [35]-[37]. Bu aşamada pist eğimi ve rüzgâr koşulları ihmal edilmiştir. Buna göre F27-500 uçağı için pistlerin tümü uygun bulunurken, A300-B4 uçağı için 8 havaalanının pisti uygun bulunmamıştır (Tablo 2).

Havayolu taşımacılığında trafiği az olan bir havaalanının ADÜ olarak belirlenmesi bu havaalanına yeni yatırımların yapılmasını zorunlu kılar ve söz konusu yatırımlar diğer taşımacılık türlerine göre oldukça yüksek maliyetlidir. Bu amaçla çalışmada "trafik miktarı düşük olan düğümlerin ADÜ olmasını engelleyen kısıt (10)" geliştirilmiş, bir düğümün ADÜ olarak belirlenebilmesi için gerekli minimum trafik miktarı (T) yıllık 100 ton olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda 3 havaalanının trafiğinin 100 tonun altında olduğu saptanmıştır (Tablo 2). Literatürde $\alpha = 0,9$ olarak ele alındığından, bu çalışmada aynı katsayı kullanılmıştır [38]-[39]. Havaalanları arasındaki uçuş mesafeleri için Grafliht programı kullanılmış, model GAMS'de kodlanmış ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür.

4 Hesaplama Sonuçları

Önerilen modelin testi, p'nin farklı değerleri ile farklı iki uçak tipi için yapılmıştır. F27-500 uçağı ve A300-B4 uçağı için yapılan analiz sonuçları sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3'de EK Modeli ile Yeni Modelin analiz sonuçlarına göre ADÜ yerleşimleri ve toplam maliyetler arasında önemli farklılıklar görülmektedir. Çalışmada yer alan 18 havaalanının

pistlerinin F27-500 uçağının kalkış ve inişi için yeterli olması sebebiyle, bu uçak için ağ içinde yer alan her havaalanı (9) kısıtını sağlamaktadır. Bunun yanında Tablo 2'den görüldüğü üzere (10) kısıtı 15 havaalanı için sağlanmaktadır. Buna bağlı olarak analiz sonuçlarındaki maliyet ve ADÜ yerleşimlerdeki farklılığın en önemli nedeni olarak (8) kısıtı ön plana çıkmaktadır.

EK Modelinde ADÜ'lere atamaların p=4 durumu da dâhil olmak üzere ESB ve IST havaalanlarında yoğunlaştığı, ancak Yeni Modelde atamaların sadece ESB havaalanında toplandığı ve diğer üç ADÜ'ye, ADÜ olarak atanan havaalanları dışında herhangi bir havaalanının atanmadığı saptanmıştır. Şekil 1'de F27-500 uçağının verilerine göre p=4 için ADÜ yer seçimleri ve atamaları görülmektedir. Şekilde ADÜ'ler daire ile gösterilmiştir.

Yüksek trafiği nedeniyle ADÜ olması beklenen IST havaalanının Yeni Modelin analiz sonuçlarında ADÜ olarak belirlenmediği görülmektedir. EK Modeli analiz sonuçlarına göre IST havaalanına yapılan atamaların Yeni Modelde ESB havaalanına kaydığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni ESB ve IST havaalanlarının, ağ yapısında bulunan 4 havaalanı dışında (ASR, BJV, DLM ve SAW) aynı havaalanlarına trafiğinin olması ve ESB'nin havaalanı ağının ortasında bulunmasıdır. Bu durumda model, özellikle menzil kısıtı nedeniyle artan maliyeti en küçüklemek amacı ile yüksek oranda ve aynı havaalanları ile trafiği olan iki ADÜ yerine tüm trafiği tek bir ADÜ üzerinden yönlendirmekte ve IST havaalanına göre daha düşük trafiği olmasına rağmen ESB havaalanını ADÜ olarak belirleyerek atamaları bu havaalanına toplamaktadır.

Elde edilen sonuçlar Yeni Modelin, eklenen kısıtlar doğrultusunda oluşan maliyet artışı nedeniyle aynı trafik bağlantısına sahip birden fazla ADÜ'ye yoğunlaşmak yerine tek ADÜ'ye yoğunlaşmayı esas aldığını göstermektedir. Burada ADÜ yerleşimini belirleyici diğer bir faktörün de havaalanının konumu olduğu görülmektedir.

Yeni Model ile özellikle menzil kısıtı nedeniyle artan seyahat mesafelerinin, dolayısı ile sefer maliyetlerinin en küçüklenmesi amacı ile havaalanı ağının merkezinde bulunan bir havaalanı ADÜ olarak belirlenmekte ve atamalar büyük oranda bu havaalanına toplanmaktadır. A300-B4 uçağının menzili, çalışmada yer alan her (i, j) çifti için (8) kısıtını sağlamaktadır. Bunun yanında Tablo 2'den görüldüğü üzere (10) kısıtı 15 havaalanı için sağlanmaktadır. Çalışmada yer alan 18 havaalanından 8'inin pisti A300-B4 uçağının kalkış ve inişi için yeterli olduğundan (9) kısıtını bu 8 havaalanı sağlamaktadır (Tablo 2). Tablo 4'deki analiz sonuçlarına göre sadece p=4 olması durumunda EK Modeli ile yeni geliştirilen modelin sonuçlarının farklılık gösterdiği göze çarpmaktadır. Analiz sonuçlarındaki farklılık Yeni Modelde yer alan (9) kısıttan kaynaklanmaktadır.

Tablo 4'de yer alan 7. analiz (EK Modeli) sonucuna göre ADA havaalanı ADÜ olarak seçilirken 8. analizde bu havaalanı yerine pist gerekliliklerini sağlayan AYT havaalanı ADÜ olarak belirlenmiştir. Bu durum toplam maliyette de EK Modeline göre küçük bir artışa sebep olmuştur.

Şekil 2'de A300-B4 uçağının verilerine göre p=4 için ADÜ yerleşimleri ve atamaları görülmektedir. Şekilde ADÜ'ler daire ile gösterilmiştir. Görüleceği üzere ADÜ olmayan havaalanlarının trafikleri IST ve ESB havaalanlarında toplanmıştır.

Şekil 1 ve Şekil 2 karşılaştırıldığında, F27-500 için tüm trafikler sadece ESB havaalanında toplanırken, A300-B4 için trafiğin IST ve ESB havaalanlarında toplandığı görülmektedir.

Bu sonuç, uçakların sefer maliyeti ve performans karakteristiklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde Tablo 3 ve Tablo 4'de Yeni Modelin kullanıldığı analizlerde, farklı uçak tipleri için ADÜ olarak ESB dışında farklı havaalanlarının seçilmiş olması da aynı sebebe dayanmaktadır. Ayrıca her iki modelden elde edilen analiz sonuçları ADÜ sayısı arttıkça toplam maliyetlerin düştüğünü göstermektedir. Bununla birlikte özellikle F27-500 için elde edilen toplam taşıma maliyet değerlerinin A300-B4'e göre her durumda çok daha yüksek olması düşük taşıma kapasitesine sahip uçakların tek başına bir havaalanı ağı içerisinde kullanılmasının uygun olmadığı sonucunu da ortaya çıkarmaktadır.

Çalışmada geliştirilen model, kabul görmüş bir veri kümesi ile ayrıca test edilmiştir. Bu amaçla Türkiye karayolu kargo dağıtım hizmeti için Tan ve Kara, (2007) ile Alumur v.d., (2009)'nın önerdiği veri kümesi (Turkish Network) kullanılmıştır [40]-[41]. Veri kümesinde Türkiye'de bulunan 81 il için karayolu seyahat mesafeleri, seyahat süreleri, akışlar, sabit hat maliyetleri ve ADÜ maliyetleri yer almaktadır. İlgili veri kümesi için analiz sonuçları Tablo 5'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere düğüm sayısının fazla olduğu ağ yapılarında

Yeni Modelde kullanılan kısıtların etkileri açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu veri kümesi için menzil değeri (S) 700NM'e karşılık gelen 1300km alınmıştır. Düğümün ADÜ olma uygunluğunun belirlenmesinde ise illerde bir havaalanı bulunup bulunmamasına göre değerlendirme yapılmış, ilde havaalanı varsa RAK "1", diğer durumlarda RAK "0" olarak alınmıştır. Gerekli minimum trafik miktarı (T) için, il bazında yıllık ortalama toplam trafik miktarı olan 837000 ton değeri kullanılmıştır.

Tablo 5'deki EK Modeli ve Yeni Modelin analiz sonuçları karşılaştırıldığında ADÜ yerlerinin değiştiği, maliyetlerin de arttığı görülmektedir. $p=4$ için EK Modelinde ADÜ olarak belirlenen illerin Yeni Modelde yer alan (9) ve (10) kısıtını sağladığı tespit edilmiştir (Tablo 2). Bu durum, EK Modeli ile Yeni Modeldeki ADÜ seçimi farklılığının doğrudan (8) menzil kısıttan, yüksek maliyet artışının ise modele yeni eklenen üç kısıttan kaynaklandığını göstermektedir. Tüm bu sonuçlar; özellikle taşımacılık sektöründe kullanılan ADÜ ağ yapılarında ana dağıtım üssü yerleşimlerinin, sadece düğümler arasındaki trafik miktarına, birim taşıma maliyetlerine ve mesafeye bağlı olmadığını, ilgili sektörün ve aracın karakteristiklerinden de önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir.

Tablo 2: Havaalanlarının pist yeterlilik ve kargo süreklilik durumları.

IATA Kodu		IST	ADB	ESB	ADA	AYT	TZX	DLM	GZT	DIY	SAW	BJV	ASR	MLX	ERZ	VAN	DNZ	KSY	EZS
Pist Yeterliliği	<u>F27-500</u>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<u>A300-B4</u>	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
Kargo Sürekliliği		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Tablo 3: F27-500 uçağı için analiz sonuçları.

Analiz	ADÜ Sayısı	Model	Toplam Maliyet (x10 ⁶)	ADÜ Seçim
1	p=1	EK Modeli	31,12	IST
2	p=1	Yeni Model	46,52	ESB
3	p=2	EK Modeli	29,92	ESB, IST
4	p=2	Yeni Model	46,23	ESB, TZX
5	p=3	EK Modeli	28,63	ADB, ESB, IST
6	p=3	Yeni Model	46,15	ADA, ESB, TZX
7	p=4	EK Modeli	27,90	ADB, IST, ESB, TZX
8	p=4	Yeni Model	46,10	ADA, DIY, ESB, TZX

Tablo 4: A300-B4 uçağı için analiz sonuçları.

Analiz	ADÜ Sayısı	Model	Toplam Maliyet (x10 ⁶)	ADÜ Seçim
1	p=1	EK Modeli	9,81	IST
2	p=1	Yeni Model	9,81	IST
3	p=2	EK Modeli	8,90	ADB, IST
4	p=2	Yeni Model	8,90	ADB, IST
5	p=3	EK Modeli	8,02	ADB, ESB, IST
6	p=3	Yeni Model	8,02	ADB, ESB, IST
7	p=4	EK Modeli	7,46	ADA, ADB, ESB, IST
8	p=4	Yeni Model	7,65	AYT, ADB, ESB, IST

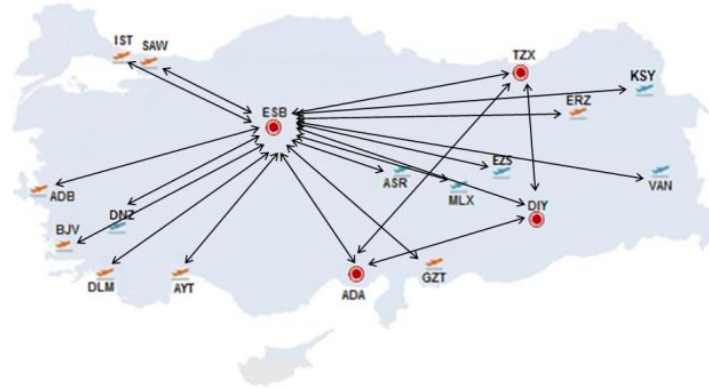
Tablo 5: "Turkish Network" veri kümesi için analiz sonuçları.

Analiz	ADÜ Sayısı	Model	Toplam Maliyet (x10 ⁶)	ADÜ Seçim
1	p=1	EK Modeli	18,79	ISTANBUL
2	p=1	Yeni Model	65,20	KONYA
3	p=2	EK Modeli	18,56	ANKARA, ISTANBUL
4	p=2	Yeni Model	60,79	ADANA, KONYA
5	p=3	EK Modeli	18,32	ANKARA, DIYARBAKIR, ISTANBUL
6	p=3	Yeni Model	57,41	ADANA, KONYA, SAMSUN
7	p=4	EK Modeli	18,10	ANKARA, DIYARBAKIR, GAZİANTEP, ISTANBUL
8	p=4	Yeni Model	56,22	ADANA, KONYA, ORDU, SAMSUN

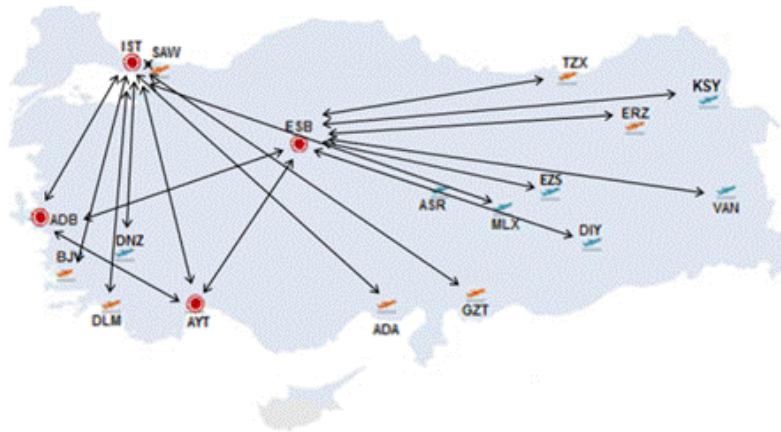
5 Sonuç ve Öneriler

Çalışmada yapılan analizler sonucunda p-ADÜMP'ne yeni kısıtların eklenmesiyle birlikte beklendiği üzere EK Modeline göre taşıma maliyetinde artış ortaya çıkmıştır. Bu artışın ana nedeni EK Modelinin klasik bir model olup havayolu taşımacılığına özel birtakım gereksinimleri dikkate almayan bir model olmasıdır. Bir havayolu işletmesinin sadece EK Modelini dikkate alarak ADÜ ağ yapısı oluşturması, operasyonlar sırasında daha önce öngörülme-yen yüksek maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Ağ yapısını kullanan işletmeler için ağ tasarımının stratejik önemi vardır. Bu çalışma ile modelin uygulandığı alanın karakteristik

özellikleri ve taşıma aracı tipi göz önüne alınmaksızın sadece trafik miktarı, taşıma maliyeti, maliyet azaltma katsayısı ile ana dağıtım üssü kullanılan bir ağ yapısı oluşturmanın her zaman doğru sonuçlar vermeyeceği ortaya konmuştur. Özellikle yüksek maliyetli havayolu taşımacılığında uçağın menzili, havaalanının uçak tipine göre uygunluğu, havaalanında gerçekleşen kargo trafiğinin yoğunluğu gibi sektörel özellikler ana dağıtım üssü seçiminde önemli faktörler olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmanın sonuçlarının havayolu işletmeleri için ağ yapısını oluşturmada ve filo planlamasında yol gösterici nitelikte olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1: F27-500 uçağına göre p=4 için ADÜ yerleşimleri ve atamaları.



Şekil 2: A300-B4 uçağına göre p=4 için ADÜ yer seçimleri ve atamaları.

Çalışmadan edinilen bilgi ve ulaşılan sonuçlar dikkate alınarak yeni geliştirilen kısıtların farklı alanlara uygulanabilirliği araştırılabilir. Örneğin kablolu ya da kablosuz telekomünikasyon ağlarında alıcı ile verici arasında mesafe arttıkça gönderilen yayının kalitesi düşer. Buna bağlı olarak alıcı ve verici arasında mesafenin belli bir değerin üzerine çıkmaması gerekir. Geliştirilen maksimum taşıma mesafesi kısıtı bu yaklaşımı desteklemektedir. Aynı şekilde taşımacılığın herhangi bir modunda bir tesisin ADÜ olarak kullanılması için personel, ulaşım kolaylıkları, coğrafik yapı hatta bölgenin sosyal, kültürel ve ekonomik karakteristikleri ile bölgenin trafik yoğunluğu o bölgeye ADÜ açma, dolayısıyla yatırım yapma kararını etkileyecek önemli faktörlerdir.

Çalışmada geliştirilen bir düğümün ADÜ olma uygunluk ve minimum trafik kısıtları ile sözü geçen faktörlerin farklı taşımacılık modları için değerlendirilmesi ve ADÜ yerleşim problemi içerisinde öngörülmesi mümkün olabilir.

Yukarıda sözü edilen yaklaşımlardan yola çıkılarak farklı taşımacılık modlarına özgü sektörel özellikler dikkate alınarak tanımlanacak yeni kısıtlar altında ağ yapısı oluşturma ve filo planlama ayrı bir araştırma konusu olarak incelenebilir. Bu çalışma doğrultusunda özellikle düğümler arası trafiğin homojen olmadığı ağ yapılarında toplam maliyeti azaltmak için farklı taşıma araçları kullanılarak çok modlu taşımacılık ağı oluşturma konusunda benzer yeni bir modelin geliştirilmesi seçeneği de değerlendirilmelidir.

6 Kaynaklar

- [1] Campbell, J. F., "Hub location and the p-hub median problem", *Operations Research*, 44, 6., 1-13, 1996.
- [2] O'Kelly, M. E., "The Location of interacting hub facilities", *Transportation Science*, 20, 2., 92-106, 1986.
- [3] O'Kelly, M. E., "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities", *European Journal of Operational Research*, 32, 393-404, 1987.
- [4] Campbell, J. F., "Integer programming formulations of discrete hub location problem", *European Journal of Operations Research*, 72., 387-405, 1994.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Sohn, J., Park, S., "Efficient solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems", *European Journal of Operational Research*, 108., 118-126, 1998.
- [8] Ernst, A. T., Krishnamoorthy, M., "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem", *Location Science*, 4, 3., 139-154, 1996.
- [9] Ebery, J., "Solving large single allocation p-hub problems with two or three hubs", *European Journal of Operational Research*, 128., 447-458, 2001.
- [10] Alumur, S., Kara, B., Y., "Network hub location problems: the state of the art", *European Journal of Operational Research*, 190., 1-21, 2008.
- [11] Hekmatfar M. ve Pishvae M., *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*, Physica-Verlag Heidelberg, 2009.
- [12] 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.
- [13] Brueckner, J. K., "Network structure and airline scheduling", *The Journal of Industrial Economics*, 52., 291-312, 2004.
- [14] Yan, S., Chen, S., Chen, C., "Air Cargo fleet routing and timetable setting with multiple on-time demands", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42, 5., 409-430, 2006.
- [15] Yan, S., Tang, C., Fu, T., "An airline scheduling model and solution algorithms under stochastic demands", *European Journal of Operational Research*, 190, 1., 22-39, 2008.
- [16] Yang, T. H., "Stochastic air freight hub location and flight routes planning", *Applied Mathematical Modelling*, 33., 4424-4430, 2009.
- [17] Hsu, C., Wen, Y., "Application of grey theory and multiobjective programming towards airline network design", *European Journal of Operational Research*, 127., 44-68, 2000.
- [18] Lin, C. C., Lin, Y. J., Lin, D. Y., "The economic effects of center-to-center directs on hub-and-spoke networks for air express common carriers", *Journal of Air Transport Management*, 9., 255-265, 2003.
- [19] Marianov, V., Serra, D., ReVelle, C., "Location of hubs in a competitive environment", *European Journal of Operational Research*, 114, 2., 363-371, 1999.
- [20] Adler N. ve Berechman, J., "Evaluating optimal multi hub networks in a deregulated aviation market with an application to Western Europe", *Transportation Research Part A*, 35., 373-390, 2001.
- [21] Eiselt, H.A., Marianov, V., "A conditional p-hub location problem with attraction functions", *Computers & Operations Research*, 36., 3128-3135, 2009.
- [22] Barla, P., Constantatos, C., "Strategic interactions and airline network morphology under demand uncertainty", *European Economic Review*, 49, 3., 703-716, 2005.
- [23] Martin, J. C., Roman, C., "Hub location in the South-Atlantic airline market a spatial competition game". *Transportation Research Part A*, 37., 865-888, 2003.
- [24] Martin, J. C., Roman, C., "Analyzing competition for hub location in intercontinental aviation markets", *Transportation Research Part E*, 40., 135-150, 2004.
- [25] Adler N., Smilowitz K., "Hub-and-spoke network alliances and mergers: Price-location competition in the airline industry", *Transportation Research Part B*, 41., 394-409, 2007.
- [26] Aguirregabiria, V., Ho, C., "A dynamic game of airline network competition: Hub-and-spoke networks and entry deterrence", *International Journal of Industrial Organization*, 28., 377-382, 2010.
- [27] Adler, N., Hashai, N., "Effect of open skies in The Middle East Region", *Transportation Research Part A*, 39., 878-894, 2005.
- [28] Huang, J., Wang, Q., "Robust optimization of hub-and-spoke airline network design based on multi-objective genetic algorithm", *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 9., 86-92, 2009.
- [29] Marianov, V., Serra, D., "Location models for airline hubs behaving as M/D/c queues", *Computers&Operations Research*, 30., 983-1003, 2003.

- [30] Elhedhli, S., Hu, F. X., "Hub-and-spoke network design with congestion", *Computers&Operations Research*, 32., 1615-1632, 2005.
- [31] Camargo, R.S. de, Miranda, G. Jr., Ferreira, R.P.M., Luna, H.P., 2009. "Multiple allocation hub and spoke network design under hub congestion", *Computers & Operations Research*, 36., 3097-3106,
- [32] Lin, C., Lin, Y., Jr, Chen, Y., "The capacitated p-hub median problem with integral constraints: An application to a Chinese air cargo network", *Applied Mathematical Modelling*, 36, 6., 2777-2787, 2012.
- [33] Menou, A., Benallou, A., Lahdelma, R., Salminen, P., "Decision support for centralizing cargo at a Moroccan airport hub using stochastic multicriteria acceptability analysis", *European Journal of Operational Research*, 204., 621-629, 2010.
- [34] Boeing, *World Air Cargo Forecast 2010-2011*, Boeing Company, USA, 2010.
- [35] Fokker, *Fokker F27 Airplane Flight Manual Volume 1, Chapter 1*, Fokker Services B.V., Netherlands, 1986.
- [36] Airbus, *A300 Airplane Flight Manual*, Airbus Industrie, France, 1991.
- [37] ICAO, *Aerodrome Design Manual Part 1 and Part 3 Runways and Pavements, Doc. 9157*, ICAO, Montreal Canada, 2006.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Tan, P., Z., Kara, B., Y., "A hub covering model for cargo delivery systems", *Networks*, 49., 28-39, 2007.
- [41] Alumur, S., Kara, B., Y., Karasan, O.E., "The design of single allocation incomplete hub networks", *Transportation Research Part B*, 43., 936-951, 2009.