

YOLCU TALEPLERİ İLE FİLO ROTASI VE UÇUŞ LİSTELERİNE ÇOK AMAÇLI TAMSAYILI AĞ ALGORİTMASIYLA ÇÖZÜM YAKLAŞIMI VE TÜRK HAVA YOLLARI' NA UYGULANMASI

T.C. Marmara Üniversitesi
İ.İ.B.F. Dergisi
YIL 2004, CILT XIX, SAYI 1

Dr. S. Erdal DİNÇER*

ÖZET

Bir hava yolu şirketi için filo rotası ve uçuş listeleri pazardaki rekabet gücünü ve servis kalitesini, dolayısıyla da doğrudan doğruya karlılığını etkilemede enönemli unsurların başında yer almaktadır. Bu çalışma ile daha iyi bir filo rotası ve uygun zaman tablolarının oluşturulabilmesine yönelik olarak bir model geliştirilmesine yönelik olarak bir model geliştirilmesine ve bunun içinde bir çözüm algoritmasının oluşturulmasına çalışılmıştır. Çalışmada yeralan model tamsayılı çoklu ürün akış ağı problemi olarak tasarlanmıştır. Modelin çözüm algoritmasında ise lagragian yaklaşımı, alt gradient yöntemi, ağ simplex metodu, en düşük maliyet akışı algoritması ve akış çözümü algoritmalarından yararlanılarak problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Uygulamaya yönelik olarak gerçekleştirilen çalışma için gerekli veriler THY'dan elde edilmiş ve oldukça uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

GİRİŞ

Filo rotası ve uçuş listeleri hava yolu şirketleri için oldukça önemli işleve sahip iki ana problemi oluşturmaktadır. Normal koşullarda ağ akış teknikleri pekçok kompleks matematiksel problemin çözülebilmesi ve tek bir modele dönüştürülebilmesi için yeterli olmaktadır. Ancak, geleneksel yaklaşımlar hem işlemlerde yeralan birbiriyle ilişkili çok sayıda yargıyı ve karar alma işlemini, hem de arz ve talep arasındaki ilişkiyi sistematik olarak doğrudan yönlendirebilme ve yönetebilme kapasitesine sahip değildir. Bu çalışmanın amacı yolcu talepleri ile uçuş imkanları arasındaki içsel ilişkiyi etkili bir şekilde ortaya çıkararak doğrudan yönetilebilir bir hale getirebilmektir. Filo rotası ve uçuş listelerinin havacılık işlemleri içerisinde son derece kritik iki aktiviteyi oluşturması, özellikle, bu iki faaliyetin uçağın etkili bir şekilde kullanımının, zaman tablolarının oluşturulmasının, uçak bakımının ve mürettebat listesinin oluşturulmasında etkili olmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, tüm bu faaliyetler bir hava yolu şirketi için pazardaki rekabet gücünü ve servis kalitesini, dolayısıyla da doğrudan doğruya

* M.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Ekonometri Bölümü Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi.

karlılığını etkilemede son derece önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Uçuş listesi işlemi genel olarak birbirleriyle bağıntılı iki aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla listenin oluşturulması ve listenin geliştirilmesi aşamasıdır. Oluşturma aşaması proje talebine göre bir taslak zaman tablosu, pazar payı ve kullanılabilir hava alanlarının zaman uygunluklarının biraraya getirilmesinden meydana gelmektedir. Bu işlemde sonra, taslak zaman tablosu tasarımı geliştirme evresi süresince işlem yapılabilirliği, maliyet ve performans kriterlerine göre teste tabi tutulur. Yapılabilirliğin geliştirme evresi süresince test edilmesinde dikkat edilmesi gereken kriterler; filo rotaları, filo büyüklüğü, mürettebat dağılımı ve bakım düzenlemeleridir. Bu aşama sırasında herhangi bir iyileştirme oluşturma aşamasındaki zaman tablosunun gözden geçirilerek daha da geliştirilmesine etki etmektedir. Uçuş listesi oluşturma işlemi bu iki aşamanın istenilene uygun bir zaman tablosunun elde edilmesine kadar devam etmektedir¹.

Pek çok hava yolu şirketi filo rotası ve uçuş listesi uygulamalarında deneme yanılma yolunu kullanmaktadır. Listenin oluşturulması ve geliştirilmesi aşamasını elle tekrar tekrar gerçekleştirme yoluna gitmektedirler. Bu yaklaşım işlem boyutunun artması durumunda hiç de uygun olmayan sonuçlara neden olabilmektedir. Bu konuda etkili bir çözüm yaklaşımı Yan ve Young tarafından çoklu filo rotası ve çoklu duraklı uçuş listesi olarak ele alınmıştır.

Yan ve Young yaklaşımı geleneksel deneme yanılma yaklaşımından da etkili ve daha sistematik, mukayeseli iki aşamalı iterasyon probleminin etkili çözümüne yönelik bir matematiksel model geliştirmesini kapsamaktadır. Buna rağmen bu yöntem de hala planlayıcı personelin tecrübelerinden hareketle ilksel olarak oluşturulan zaman tablolarından hareket etmekte ve bunu iki aşama işleminde kullanmaktadır. Genel olarak seyahat talebi kabaca imkanlar ile ilişkilendirilmektedir (örn; uçak büyüklüğü, servis sıklığı ve yol alternatifleri).

Yan ve Young'un çalışmasına ilaveten çeşitli hava yolu program modelleri geliştirilmiş olup bunlardan en dikkat çekici olanları Abara'nın sabit uçuş-kalkış zamanları ile filo ataması için tamsayılı doğrusal programlama modeli, Teodorovic ve Kremar-Nozic'in mukayese koşulları altında uçuş sıklıkları üzerine çok amaçlı karar alma modeli, Balakrishnan ve diğerlerinin uzun yol rotaları üzerine karışık tamsayılı programlama modeli ve Han ve diğerlerinin günlük uçak rota ve listesi problemlerinin çözümüne yönelik çoklu ürün ağ akış modeli dir².

¹ Yan S, Young HF. A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling. Transportation Research 1996; 30A:379-98.

² Yan S. Approximating reduced costs under degeneracy in a network flow problem with side constraints. Networks 1996;27:267-78.

MODEL YAKLAŞIMI

Zaman-mesafe ağı tekniği, ulaştırma işlemiyle faaliyet gösteren işletmelerin karlılığını maksimize etmeyi amaçlayan filo rotası ve uçuş listelerinin bir bütün halinde oluşturularak uygulanmasına yöneliktir. Bu model ağ içerisinde yer alan her bir uçak ve yolcunun birlikte optimal bir şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, doğrudan uçuşların, çoklu duraklı uçuşların ve çoklu filoların sistematik bir şekilde idare edilmesini de gerektirmektedir. Modeldeki ana unsurlar filo-akış zamanı-mesafe ağı, yolcu-akış zamanı-mesafe ağı ve matematiksel formülasyonudur³.

Filo-akış zamanı-mesafe ağı

Bu tür çalışmalar defalarca zaman-mesafe ağında çoklu filo rotaları ve uçuş listeleri problemlerine formülize edilmiş ve her bir işlem sonucunda çeşitli zaman periyodu ve mesafe konumunda uçağın potansiyel hareketlerinin spesifik durumlarını ortaya koymuştur. Modelin oluşturulmasında kullanılan düğüm noktaları ve yaylar ağdaki iki ana kısmı oluşturmaktadır. Her bir düğüm noktası bir hava alanının özel bir zaman dilimi için tasarlanmaktadır. Dizaynın ifadesinde yay'ın gece konaklaması, alanda kalış ve uçuş ayağı gibi bir faaliyeti ifade etmesi gerekmektedir. Yay akışları ağdaki uçağın akışını göstermektedir. Üç farklı yay türünden söz etmek mümkündür. Bunlar⁴;

1-Uçuş ayağı yayı

uçuş ayağı yayı iki farklı hava alanı arasındaki uçuş bağlantısını ifade etmektedir. Tüm muhtemel uçuş ayakları Kabul edilebilir zaman aralıklarında ağa yerleştirilir. Bu yerleştirme işleminde kullanılabilir uygun hava alanları olabildiğince ön planda tutulmak zorundadır. Her bir uçuş ayağı kalkış yapılacak hava alanı, kalkış zamanı, varışın gerçekleşeceği hava alanı, varış zamanı ve işlem maliyeti bilgilerini içermektedir. Bir uçuş ayağı için zaman dilimi uçağın uçuş için hazırlanmasından ve bu uçuş ayağının tamamlanmasına kadar geçen toplam zamanı kapsamaktadır. Bu zaman dilimini kalkıştan önceki araştırma, yakıt alımı, yolcu/bagaj yüklemesi ve havada geçen süre oluşturmaktadır. Yay akışının üst sınırı bir, alt sınırı ise sıfır dir. Bunlara ilave olarak aynı hava alanı için kalkış aralıkları taşıyıcı işletmelerin işlem isteklerinin düzenlenmesi yoluyla da tasarlanabilir⁵.

³ Yan S, Tu Y. Multifleet routing and multistop flight scheduling for Schedule perturbation. European Journal of Operational Research 1997;103:155-169.

⁴ Yan S. Approximating reduced costs under degeneracy in a network flow problem with side constraints. Networks 1996;27:267-78.

⁵ Yan S, Young HF. A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling. Transportation Research 1996; 30A:379-98.

2-Alan (yer) yayı

Alan yayı belirli bir zaman çerçevesi içerisinde bir hava alanında uçakların bekleme ve gece kalışlarını temsil etmektedir. Yay maliyeti, hava alanı vergisi, hava alanı kullanım ödeneği, geçiş kullanımı ödeneği ve bunlarla ilişkili giderlerden meydana gelmektedir. Yay akışının üst limiti şayet kapasite büyükse sınırsız, eğer değilse apron kapasitesi ile sınırlı olup alt limiti ise sıfırdır⁶.

3-Döngü yayı

Döngü yayı fonksiyonu birbirini takip eden iki planlama periyodu arasındaki sürekliliği ifade etmektedir. Döngü yayı, her bir hava alanı için bir süreç diliminin bitişini gelecek süreç diliminin başlangıcına bağlamaktadır. Yay akışının alt ve üst limitleri alan yayına benzer şekilde yay maliyetleri ile sınırlıdır⁷.

Yolcu-akış zamanı-mesafe ağı

Zaman-mesafe ağı tekniği yolcu hareketlerinin zaman ve yerleşim açısından uygunluğunu ortaya koymaya çalışmaktadır. Her bir yolcu-akış zamanı-mesafe ağı başlangıç tablosundan oluşturulan özel başlangıç ayrımlarını göstermektedir. Bu ağlar, sistematik olarak filo-akış zamanı-mesafe ağlarından problemin çözümünü kolaylaştırmak için tasarlanırlar. Bir düğüm noktası spesifik bir zaman dilimini içerisindeki bir hava alanını temsil etmektedir. Bununla birlikte, bir yay yolcu hareketlerini gösteren bir faaliyet olarak dizayn edilmektedir. Üç farklı yay' dan söz edilebilir. Bunlar⁸;

1-Dağıtım yayı

Dağıtım yayı yolcuların bir hava alanından bir diğerine uçuş ile taşınması olarak ifade edilmektedir. Ulaştırma zamanı filo-akış zamanı-mesafe ağında ortak uçuşlar için uygun zaman dilimine karşılık gelecek şekilde gerçekleştirilir. Yay maliyeti her bir yolcu için gereken servise

⁶ Abara J. Applying integer linear programming to the fleet assignment problem. Interfaces 1989; 19:20-8.

⁷ Ahuja RK, Magnanti TL, Orlin JB. Network flows, theory, algorithms and applications. Englewood Cliffs: Prantice Hall, 1993.

⁸ Teodorovich D. Airline Operations Research. New York: Gordon and Breach Science, 1988.

göre değişken maliyetlidir. Yay akışının üst sınırı uçağın kapasitesi ile alt sınırı ise sıfır ile sınırlıdır.

2-Kalış yayı

Kalış yayı belirli bir zaman dilimi çerçevesinde bir yolcunun hava alanında kalmasını ifade etmektedir. Yayın maliyeti sıfırdır. Çünkü, pratik olarak hiç bir yolcu zorunlu olmadıkça hava alanında kalmak istememektedir. Yayın üst sınırı istasyonun yolcu servis kapasitesi ile sınırlı olup alt sınırı ise sıfır dır⁹.

3-Talep yayı

Talep yayı ağdaki uygun başlangıç dağılım çiftlerinin varış ve kalkış istasyonlarını birbirine bağlamaktadır. Yay maliyeti ortalama bilet tutarının negatif değerine eşittir. Yayın üst sınırı başlangıç dağılım çiftlerinin öngörülen talebine bağlı olup, alt sınırı ise sıfırdır. Belirli bir başlangıç dağılım çifti için yolculuk talebi, güncel talep eğilimi, Pazar özellikleri veya taşımacı firmanın sahip olduğu özelliklere göre çeşitli talep yaylarına ayrılabilir¹⁰.

MODEL FORMÜLASYONUNDA KULLANILAN SEMBOLLERİN TANIMI

Modelin açıklanmasından önce modelde yer alan sembollerin tanımlanması işlemin anlaşılabilirliğinin sağlanmasına katkıda bulunacaktır. Modelde yer alan semboller aşağıda gösterilmiştir¹¹.

m: m. filo

M: Tüm filoların oluşturduğu küme

n: n. başlangıç dağılım çifti

N: Tüm başlangıç dağılımlarının oluşturduğu küme

A_m: m. filo ağındaki tüm yayların oluşturduğu küme

B_n: n. yolcu ağındaki tüm yayların oluşturduğu küme

X_{ij}^m: m. filo ağındaki akış yayı (i,j)

Y_{ij}ⁿ: n. yolcu ağındaki akış yayı

C_{ij}^m: m. filo ağındaki yay maliyeti

⁹ Powell WB. A review of sensitivity results for linear Networks and a new approximation to reduce the effects of degeneracy. Transportation Science. 1989;23:231-43.

¹⁰ Teodorovich D, Guberinic S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a Schedule perturbation. European Journal Operational Research. 1984;15:178-82.

¹¹ Yan S, Young HF. A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling. Transportation Research 1996; 30A:379-98.

T_{ij}^n : n. yolcu ağındaki yay maliyeti
 NF_m : m. filo ağındaki tüm düğüm noktalarının oluşturduğu küme
 NP_n : n. yolcu ağındaki tüm düğüm noktalarının oluşturduğu küme
 CF_m : m. filo ağındaki tüm çevrim yaylarının oluşturduğu küme
 AF_m : m. filo ağındaki tüm kullanılabilir uçakların sayısı
 FF : Tüm uçuş yaylarının oluşturduğu küme
 S^a : a. istasyondaki uçuş yaylarının oluşturduğu küme
 Q^a : a. istasyondaki uygun uçuş kontenjanı
 SA : Tüm istasyonların oluşturduğu küme
 K^m : m. filo ağındaki uçak kapasitesi
 U_{ij}^m : m. filo ağındaki yay akışının üst sınırı
 U_{ij}^n : n. yolcu ağındaki yay akışının üst sınırı

MODEL FORMÜLASYONU

Filo akışı ve yolcu akışı ile mesafeye göre düzenlenen ağların oluşturulmasında tam sayılı ağ akış problemi formülasyonundan hareket edilmektedir. Çok sayıda dikkat edilmesi gereken hareket sözkonusudur¹². Buna göre genel algoritma aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

(I).Formülasyon

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Minimum } Z = \sum_{m \in M} \sum_{ij \in A_m} C_{ij}^m X_{ij}^m + \sum_{n \in N} \sum_{ij \in B_n} T_{ij}^n Y_{ij}^n$$

Kısıt denklemleri:

$$(1) \quad \sum_{j \in NF_m} X_{ij}^m - \sum_{k \in NF_m} X_{ki}^m = 0, \forall i \in NF_m, \forall m \in M$$

$$(2) \quad \sum_{j \in NP_n} Y_{ij}^n - \sum_{k \in NP_n} Y_{ki}^n = 0, \forall i \in NP_n, \forall n \in N$$

$$(3) \quad \sum_{ij \in CF_m} X_{ij}^m \leq AF_m, \forall m \in M$$

$$(4) \quad \sum_{m \in M} X_{ij}^m \leq 1, \forall ij \in FF$$

¹²Yan S, Tu Y. Multifleet routing and multistop flight scheduling for Schedule perturbation. European Journal of Operational Research 1997;103:155-169.

- (5) $\sum_{m \in M} \sum_{ij \in S_a} X_{ij}^m \leq Q^a, \forall a \in SA$
- (6) $\sum_{n \in N} Y_{ij}^n \leq \sum_{m \in M} K^m X_{ij}^m, \forall ij \in FF$
- (7) $0 \leq X_{ij}^m \leq U_{ij}^m, \forall ij \in A_m, \forall m \in M$
- (8) $0 \leq Y_{ij}^n \leq U_{ij}^n, \forall ij \in B_n, \forall n \in N$
- (9) $X_{ij}^m \in \text{tamsayı}, \forall ij \in A_m, \forall m \in M$
- (10) $Y_{ij}^n \in \text{tamsayı}, \forall ij \in B_n, \forall n \in N$

Model tamsayı ağ akış problemi formülizasyonundan hareketle oluşturulmuştur. Modeldeki amaç fonksiyonu sistem maliyetinin minimizasyonuna yöneliktir. (1) ve (2) no' lu kısıtlar her bir filo/yolcu ağındaki tüm düğüm noktalarında akış muhafazasını sağlamaya yöneliktir. (3) no' lu kısıt kullanılabilir uçak sayısını aşmamak kaydıyla her bir filo için kullanılan uçak sayısını göstermekte, (4) no' lu kısıt her bir uçuşun en fazla bir kere gerçekleştirildiğini, (5) no' lu kısıt her bir istasyonda uygun kontenjani aşmamak kaydıyla ortalama uçuşları sağlamakta, (6) no' lu kısıt uçak taşıma kapasitesine göre yolcu ulaştırma hacmini göstermekte, (7) ve (8) no' lu kısıtlar tüm kısıtlar altında tüm yay akışlarını tanımlamakta ve (9) ve (10) no' lu kısıtlar ise uçak/yolcu akışlarının bütünlüğünü sağlamaktadır¹³.

ÇÖZÜM ALGORİTMASI

Bu çalışma tam sayılı çoklu ürün ağ akış probleminin alt gradient metodu ile lagranja adaptasyonunu içermektedir. Çözüm aşaması ilk olarak yan kısıtların lagranjyan problemin oluşturulmasına ve çözülmesine yönelik olarak gevşetilmesini gerektirmektedir. Burada amaç optimal çözümün indirgenmiş sınırını bulmaktır. İkinci olarak da araştırma süresince geliştirilmiş olan sezgisel yaklaşımın optimal çözümün üst sınır değerine ulaşmak için uygulanması söz konusudur. Daha sonra lagrange çarpanlarının tekrarlanması ve gözden geçirilmesi için spesifik alt gradient metodu alt ve üst sınırların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu işlem yakınsak çözümün kabul edilmesine veya iterasyon tekrarının

¹³ Fisher ML. The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. Management Science. 1981;27:1-18

belirlenen sayıyı aşmasına kadar devam ettirilir. Çözüm algoritmasının ana kısımları aşağıda yer almaktadır¹⁴.

Alt sınır

Alt sınırın araştırılmasında gerçekleştirilen çözüm işlemlerine ait adımlar aşağıda yer almaktadır.

Adım.1. Yan kısıtlar (3-6) uygun negatif olmayan lagrange çarpanları kümesi ile (μ_3, μ_4, μ_5 ve μ_6) gevşetilirlir ve (I) formülündeki amaç fonksiyonuna ilave edilirler. Bu ilaveyle (II) nolu formüle ulaşılır. Formül (II) için optimal amaç değeri formül (I) in alt sınırı haline döntüşür¹⁵.

(II).Formülasyon

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{m \in M} \sum_{ij \in A_m} C_{ij}^m X_{ij}^m + \sum_{n \in N} \sum_{ij \in B_n} T_{ij}^n Y_{ij}^n + \sum_{m \in M} \left(\mu_3 m \left(\sum_{ij \in CF_m} -AF_m \right) \right) +$$

$$\sum_{ij \in FF} \left(\mu_4 ij \left(\sum_{m \in M} X_{ij}^m - 1 \right) \right) + \sum_{a \in S_a} \left(\mu_5 a \left(\sum_{m \in M} \sum_{ij \in S^a} X_{ij}^m - Q^a \right) \right)$$

$$\sum_{ij \in FF} \left(\mu_6 ij \left(\sum_{n \in N} Y_{ij}^n - \sum_{m \in M} K^m X_{ij}^m \right) \right)$$

Kısıt denklemleri:

¹⁴ Fisher ML. The lagragian relaxation method for solving integer programming problems. Management Science. 1981;27:1-18

¹⁵ Barnhart C, Johnson EL, Nemhauser GL, Savelsbergh MWP, Vance PH. Branch-and-Price: column generation for solving huge integer programs. Operation Research 1998;46:316-29.

- (1) $\sum_{j \in NF_m} X_{ij}^m - \sum_{k \in NF_m} X_{ki}^m = 0, \forall i \in NF_m, \forall m \in M$
- (2) $\sum_{j \in NP_n} Y_{ij}^n - \sum_{k \in NF_m} Y_{ki}^m = 0, \forall i \in NP_n, \forall n \in N$
- (7) $0 \leq X_{ij}^m \leq U_{ij}^m, \forall ij \in A_m, \forall m \in M$
- (8) $0 \leq Y_{ij}^n \leq U_{ij}^n, \forall ij \in B_n, \forall n \in N$
- (9) $X_{ij}^m \in \text{tamsayı}, \forall ij \in A_m, \forall m \in M$
- (10) $Y_{ij}^n \in \text{tamsayı}, \forall ij \in B_n, \forall n \in N$

Adım.2: Oluşturulan (II)formülü, bağımsız iki ağ grubuna dönüştürülür. Bunlar; filo akış ağı ve yolcu akış ağıdır.

Adım.3: Filo akış ağı saf ağ akış problemi olup minimum maliyetli ağ akış problemi olarak karakterize edilebilir. Ağ simpleks yöntemi bu problemin etkin çözümünün bulunmasında kullanılabilir.

Adım.4: Yolcu akış ağı daima minimum maliyetli ağ akış problemidir. Bununla birlikte bu problemlerin her bir ağ için tek bir talep ve arza sahip olmasından dolayı problemlerin etkili çözümünün eldesi mümkün olmamaktadır bu nedenle sürekli en küçük maliyet akış artış yolu algoritması kullanılabilir. Her bir başlangıç dağılımı çiftleri bu metod da kullanılan her bir bağımsız ağa yüklenir ve her bir ağın maliyeti hesaplanır.

Adım.5: Bu iterasyon için indirgenmiş sınır sonuç olarak tüm filo akış ve yolcu akış ağ maliyetlerinin birleştirilmesiyle elde edilir¹⁶.

Üst Sınır

Sezgisel yaklaşımın geliştirilmesiyle bir üst sınır değeri elde edilir. Adımları ise aşağıda yer almaktadır¹⁷.

¹⁶ Kennington LL, Helgason RV. Algorithms for network programming. New York: John Wiley, 1980.

¹⁷ Hane C, Barnhart C, Johnson EL, Marstern R, Nemhauser GL, Sigismondi G. The fleet assignment problem:solving a large-scale integer program. Mathematical Programming Study 1995;70.211-32.

Adım.1: Yeni bir yolcu akış ağı oluşturulur. Bu ağdaki her bir dağıtım yay akışları alt sınır araştırma işleminde elde edilen tüm yolcu akış ağlarına ait uygun dağıtım yay akışlarının ortalamasıdır.

Adım.2: Oluşturulan yeni yolcu akış ağında dağıtım yayları tanımlanır. Bu tanımlamada uçağın taşıma kapasitesi ihlal edilir. Daha sonra, bozulan yayların ekstra hacimleri en az maliyet akış artışı metodu ile değiştirilmiş algoritma (I) de yer alan (6) no' lu kısıtın tatmin edilmesine kadar aşama aşama artırılır.

Adım.3: Her bir filo akış ağında, her bir uçuş için kullanılan uygun uçak tipine göre dağıtım bilet gelirlerini uçuş maliyetlerine ilave ederek muhtemel karlılık bulunur¹⁸.

Adım.4: Filo akış ağının uçuş maliyetlerinden oluşan muhtemel net karın ayrılması ile bir alt problem tarifesi oluşturulur. Amaç, sistem maliyetini minimizasyona yöneliktir. Yan koşullar (I) no' lu formüldeki (3-6) kısıtlarında olduğu üzere aynı olmalıdır.

Adım.5: Bu adım süresince alt problemin yan koşullarının gevşetilmesi işleminde lagrange çarpanları uygulanır. Alt problemin alt kısıt çözümü için ise ağ simpleks metodu kullanılır.

Adım.6: Formül (I) deki (4) no' lu kısıt için en fazla bir defaya mahsus olmak üzere her bir uçuş hizmetinin kısıtları elle değiştirilir. Uçak tipleri ekonomiklik derecesine göre düzenlenir. İlk önce bu yaylar tanımlanır. Tanımlamada diğer ağlardaki benzer uçuşlar mukayese edilerek muhtemel en büyük net kar ve bu uçuş yaylarının sonsuz yay maliyetleri oluşturulur. Daha sonra, yeni ağ akışlarından elde edilen yay maliyetleri ile ağ simpleks metodu kullanılarak tekrar ana ağ çözülür.

Adım.7: Her bir hava alanı için kullanılabilir alan iniş kontenjanı kısıtı değiştirilir (formül (I) deki (5) no' lu kısıt). Her bir hava alanı için iniş ve kalkışların toplamı bulunur ve alan kontenjanının herhangi bir nedenle ihlal edilme durumu araştırılır. Bu yay akışları m. ağa adapte edilerek tanımlanır (burada $m \leq$ uçak tipi sayısı). Bu tanımlamada şayet akış sıfır değil ise maliyet sonsuz olarak ele alınmaktadır. Daha sonra m. ağ akışları için ağ simpleks metodu uygulanır¹⁹.

¹⁸ Camerini PK, Fratta L, Maffioli F. On improving relaxation methods by modified gradient techniques. Mathematical Programming Study 1975;3:6-25.

¹⁹ Clarke LW, Hane CA, Johnson EL, Nemhauser GL. Maintenance and crew considerations in fleet assignment. Transportation Science 1996;30:249-60

Adım.8: Filo hacmi kısıtı değiştirilir (formül (I) deki (3) no' lu kısıt). M. ağdaki döngü yay arkları akışlarının toplamı alınır ve m. ağda m. filo hacminin aşılmasına neden olan uçak sayısı kontrol edilir (formül (I) deki (AF_m)). göreceli uçuşlar ile düşünülen hava alanları yardımıyla şayet gerekiyorsa kesikli akışları da kapsayacak şekilde bu döngü yayları tanımlanır ve bu döngü yaylarının üst sınırları istenilen limitlere uygun hale getirilir. Daha sonra, m. ağ akışını çözmek için ağ simpleks metodu tekrar uygulanır.

Adım.9: tüm ağlar ve hava alanı yer kontenjanlarını incelemek için 7. ve 8. adımlar gerçekleştirilir. Burada filo hacmi kısıtının doyurulmuş olmasına dikkat etmek gerekir.

Adım.10: 9. adımda elde edilen filo akış ağı 2. adımda elde edilen yolcu akış ağı ile karşılaştırılarak uygun uçuşların olmaması durumunda yolcu akışları iptal edilir.

Adım.11: Tüm uçuşlar için uçağın yüklenme durumu ölçülür. Hali hazırda uygun olup da hizmet vermeyen boş yerlere en az maliyet akış artışı algoritması yardımıyla fazla sayılar dağıtılır. Bu yüklemenin uçağın taşıma kapasitesini ihlal etmemesine dikkat edilir. Bu alt problem için üst sınır çözümü tüm ağlardaki gerçek yay maliyetlerinin filo akış ve yolcu akış ağları ile uygulanmasından elde edilen sistem maliyetlerinin bütinleştirilmesiyle elde edilir.

Adım.12: Şayet bu iterasyonda alt problemin alt ve üst sınırları arasındaki fark kabul edilebilir bir noktada yakınsamıyorsa ve iterasyon sayısı da kabul edilmiş deneme sayısı için önsel limiti aşmamışsa lagrange çarpanları alt gradyant metodu kullanılarak yenilenerek 5. adıma geri dönlür.

İterasyon işlemleri kabul edilebilir bir derecede yakınsak bir sonuç sağlayana ve daha önceden belirlenmiş deneme sayısını aşmıyana kadar devam eder. Burada elde edilen uygun çözüm yalnızca alt problemin değil orijinal problemin de uygun çözümdür²⁰.

Yakınsaklık İşlemi

Lagrange çarpanlarını düzenlemeye yönelik olarak geliştirilen değiştirilmiş alt gradient metodu bu araştırmaya uygulanarak iterasyon sonuçlarında oldukça uygun yakınsaklık değerine ulaşılmıştır. Uygulama adımları aşağıda yer almaktadır²¹.

Adım.1: $C=0$ ve $\mu_0=0$

²⁰ Barnhart C, Johnson EL, Nemhauser GL, Savelsbergh MWP, Vance PH. Branch-and-Price: column generation for solving huge integer programs. Operation Research 1998;46:316-29.

²¹ Chen HK, Chang MS, Wang CY. Dynamic capacitated user-optimal departure time/route choice problem with time window. European Journal of Operational Research. 2001;132:603-618.

Adım.2: II no' lu lagrange probleminin optimal çözümü ağ simpleks metodunu ve en düşük maliyet artışı algoritması kullanılarak bulunur. Bu işlemde alt sınır olarak $Z^L(\mu_c)$ alınır. Şayet çözüm uygun ve tamamen tatmin ediciyse bu çözüm optimal çözümdür. Bu durumda bu adımda işlem durdurulur. Aksi taktirde alt kısıt (Z^L) yenilenir.

Adım.3:Üst sınırı ($Z^U(\mu_c)$) bulmak için geliştirilen sezgisel yaklaşımın uygulanarak üst sınır (Z^U) yenilenir.

Adım.4: Şayet alt sınır (Z^L) ile üst sınır (Z^U) arasındaki fark spesifik bir tolerans (θ) aralığında yer alıyorsa algoritma durdurulur. Bu tolerans aralığı $\left| \frac{Z^U - Z^L}{Z^U} \right| < \theta$, veya iterasyon çalışmasının limit sayısıdır.

Adım.5: μ_c değiştirilmiş alt gradient metodu vasıtasıyla düzenlenir. Bu yakınsaklığın sağlanmasında yardımcı olmaktadır.

Adım.6: $C=C+1$, ikinci adıma gidilir²².

UYGULAMA

GENEL

Bu çalışmada uygulamaya konu olan araştırma konusunda kullanılan veriler Türk Hava Yolları'na (THY) ait 2002-2003 yıllarını kapsayan iç hat uçuş istatistiklerinden ve yıllık faaliyet raporlarından elde edilmiştir. Modelin çözümlenmesinde ise LINDO paket programından yararlanılmıştır. İşlem adımları sonucunda elde edilen sonuçların her bir uçağa ait rotanın incelenmesinde kullanılamamasından dolayı Ahuja ve diğerleri tarafından geliştirilmiş bir akış analizi yay zincirlerindeki hat akışlarının analizinde kullanılmıştır.

Uygulamaya konu olan araştırma THY'na ait 26 iç hat uçuşunu kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiş ve bu 26 iç hattın günlük uçuş sayısı ise 160 olarak kabul edilmiştir. Yine 2002 yılına ait verilerden günlük ortalama taşınan iç hat yolcu sayısı da 14.384 kişi olarak işleme dahil edilmiştir. Yolcu taşımacılığında kullanılan uçaklar kendi içerisinde üç ana gruba ayrılmış

²² Ball MO, Maganti TL, Monma CL, Nemhauser GL. Network routing. Handbooks in Operations Research and Management Science 1995;8.

ve işlem süreci bu üç ana grup üzerinden gerçekleştirilmiştir. Uçak tipleri ve oluşturulan gruplar hakkındaki genel bilgiler tablo.2 de yer almaktadır. Tüm maliyetler ile ilgili gereken bilgi, işlem ile kısıtlar THY' in dan elde edilmiş ve çözüm aşaması boyunca gerçekleştirilen tekrarlar ile sayısı ise daha önceki konu üzerinde yapılan çalışmalarla paralellik göstermesi açısından 1000 defa ile sınırlandırılmıştır. Uygulamada kullanılan maliyet kavramı tamamen işlem maliyetini kapsamaktadır. Sabit maliyet ve dolaylı maliyetler ise modele dahil edilmemiştir. Bundan dolayı karlılık kavramı bu çalışma için işlem karlılığına karşılık gelmektedir. İşlem karlılığı kısa vadede kar optimizasyonunu, uzun vadede ise mevcut sistemin kalıcılık ve pazar payının artışı sağlamada son derece önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, her bir uçuş için planlanan yükleme faktörünün 0.7'yi aşmamasına dikkat edilmiştir. Uçuş zamanı, istasyonlar arasındaki mesafe, alan kontenjanları ve alanda kalış zamanı gibi tüm diğer girdi değerleri işlemlerin gerçekleştirilmesi sırasında tutulan istatistiklerden oluşan raporlardan elde edilmiştir.

Filo grubu	Uçak tipi	Uçak sayısı	Yolcu kapasitesi
A	A340-313	7	271
	A310-304	5	210
B	Boeing737-800	26	165
	Boeing737-400	14	150
	Boeing737-500	2	117
C	RJ-100	8	99
	RJ-70	3	79

Tablo.2: THY' na ait uçak tipleri ve yolcu kapasiteleri

ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu çalışmada filo-akış zamanı-mesafe ağı:2, yolcu-akış zamanı-mesafe ağı ise 12 çalışma katından oluşmaktadır. Bu ağların oluşturulmasında ise 274 düğüm noktası ve 1215 yaydan yararlanılmıştır. Sonuçlar yolculukların %30' unun A (4315), %60' ının B (8631) ve %10' unun da C (1439) filo grubuyla gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bundan da anlaşılacağı üzere A filo grubu genel olarak B filo grubundan daha karlıdır. Buna ilaveten tüm yolcular yolculuklarını kesintisiz uçuş ile durmaksızın gerçekleştirmekte ve transfer işlemi gerçekleşmemektedir. Bunun muhtemel nedeni ise küçük ağ skalası ve kısa uçuş mesafesinden kaynaklanmaktadır. Talep edilen mesafe 410 km' nin içinde yer almakta bu da ekonomik olarak katlanılabilir bir durumu ifade etmektedir. Ayrıca model %2.5 lik bir hata payına sahiptir.

DUYARLILIK ANALİZİ

Uygulamada kullanılan algoritmanın performansının bir problem odaklı heuristik yapıya sahip olmasından dolayı problemin parametrelerinden etkilenmektedir. Performansı değerlendirmek ve çözümde yer alan parametrelerin etkilerini analiz etmek için filo büyüklüğü, talep, uçuş maliyeti ve bilet fiyatları gibi bazı kritik verilerin duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Filo Büyüklüğü

Yapılan bu çalışmadan görülmüştür ki, 12 uçaklı A filosu, 42 uçaklı B filosu ve 11 uçaklı C filosu ile toplam yurt içi ve yurt dışı yolcu talebi karşılanamamakta bu nedenle de işletme karlı durumda görülmesine rağmen mevcut olan iç ve dış hat pazar payının olması gerekenin çok daha altında bir paya sahip olmaktadır. Bu durum işletmenin rekabet gücünün zaman içerisinde azalmasına ve rakip işletmelerin gelişmesine olanak tanımaktadır. Araştırmadan elde edilen temel noktalardan biri filo büyüklüğünün (A, B, ve C) artırılmasının işletmenin karlılığında bir artışa neden olacağı, bunda şu anki koşullar ile A filusunun 15, B filusunun 44 ve C filusunun ise 13 uçak kapasitesine çıkarılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu durumda ulaşılabilecek karlılık düzeyi şuan ki düzeyinden %18' lik bir artışa neden olacaktır. Ancak buradaki karlılığın uçuş karlılığı ile sınırlandırılmış olduğu unutulmamalıdır.

Talep

Uygulamada, mevcut talebin hali hazırda karşılanamadığı ve bunun ilerleyen dönemlerde de filo büyüklüğünün artırılmaması durumunda yine karşılanamayacak bir gelişme içerisinde olacağı gözlenmektedir. Genel olarak, talep analizindeki dalgalanmaların (\pm %25) arasında yer alması durumunda amaç değerleri kabul edilebilir bir değişim göstermektedir.

Uçuş Maliyeti

Uçuş maliyeti bu çalışmada yer alan modelin kritik girdi değerini oluşturmaktadır. Uçuş maliyetinin uçuş maliyetinin (\pm 20) arasında tutulabilmesi durumunda amaç değerinde oldukça düşük bir değişiklik gözlemlenmektedir. Ayrıca uçuş maliyeti ile amaç değeri arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur.

Bilet Fiyatı

Bilet fiyatı taşıma gelirlerini doğrudan etkileyen bir unsur durumundadır. Bilet fiyatı değerleri ana modele liste fiyatı olarak dahil edilmiştir. Bilet fiyatlarının duyarlılığı da ($\pm\%25$) arasında incelenmiş, bilet fiyatlarındaki $\%25$ den daha düşük bir artışın $\%99$ ' luk bir servis oranında, $\%25$ lik bir fiyat indiriminin ise $\%100$ ' lük bir servis oranına karşılık sabit kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak tüm senaryolar için servis oranları benzerdir. Bunun muhtemel nedeni ise bilet fiyatlarının işlem maliyetlerinde göreceli olarak yüksek farklılık göstermesidir. Yapılan testler bilet fiyatındaki $\%1$ lik bir değişimin amaç değerinde $\%1.3$ ' lük bir değişime neden olduğunu ortaya koymaktadır.

GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada uygulamaya konu olan model ve çözüm algoritması filo rotası ve uçuş listeleri için etkili bir planlama aracı olarak kullanılmıştır. Bu model ve çözüm algoritması değişiklikleri ana faktörlere simüle edebilme ve kabul edilebilir sonuçların elde edilmesinde oldukça yardımcı bir rol oynamaktadır. Bu ana faktörlerin başında filo büyüklüğü, uçuş maliyeti ve tedarik maliyeti gibi ana kontrol değerleri yer almaktadır. Ayrıca, bu model ve çözüm algoritması gelecek talep, pazardaki esnek fiyat eğilimi, kullanılabilir uçak ve alanlar gibi değişmesi muhtemel kritik çevresel faktörlerin etkisi altında bir sistemin performansının analiz edilebilmesinde de kullanılabilir. Genel olarak model uygulaması son derece geniş tutulabilir. Tablo.2. de uygulamadan elde edilen sonuç değerleri ile senaryolar yer almaktadır. Taşıma şirketleri tüm hava alanı kombinasyonlarını oluşturarak her bir kombinasyonun karlılığını gerekli istekler çerçevesinde mukayese edebilmektedirler. Bu mukayese işletmelere yeni uçuş imkanlarını tespit etmede son derece faydalı olabilmektedir.

Tablo.2 de 26 iç hat hava alanı yer almaktadır. Bu hava alanları sırasıyla; İstanbul, Edremit, İzmir, Denizli, Bodrum, Dalaman, Antalya, Ankara, Konya, Adana, Kayseri, Samsun, G.Antep, Malatya, Ş.Urfa, Erzincan, Elazığ, Diyarbakır, Trabzon, Erzurum, Muş, Batman, Mardin, Kars, Ağrı ve Van dir.

Problem boyutunu 1215 değişken ve 274 kısıt oluşturmaktadır. Hata aralığı $\%2.5$ düzeyinde olup bu aralıkta çözüm algoritması oldukça iyi sonuç vermektedir. Tablo.2 de yer alan senaryolardan ilki olan S1, ilk on hava alanını, S2, ilk onbir hava alanını içermekte ve bunu benzer şekilde diğerleri takip etmektedir. Şayet bir hava yolu şirketi S2 senaryosu ile hareket etmek isterse, bu durumda ilk onbir hava alanını işleme dahil etmek durumundadır.

Senaryolar	Değişken Sayısı	Kısıt Sayısı	Yolcu Sayısı	Üst Sınır	Alt Sınır	Hata Aralığı (%)	Uçak Kombinasyonu
S1	82	45	3421	-976	-982	0.61	2A+4B+1C
S2	114	63	4340	-1275	-1283	0.62	3A+6B+1C
S3	166	76	5634	-2830	-2851	0.73	4A+8B+1C
S4	205	89	6071	-3172	-3196	0.75	6A+8B+1C
S5	244	103	6866	-3841	-3875	0.87	7A+10B+2C
S6	291	113	7023	-4020	-4056	0.88	6A+10B+1C
S7	383	126	7845	-4241	-4280	0.91	8A+11B+1C
S8	451	135	8266	-4865	-4913	0.97	9A+13B+1C
S9	518	148	8841	-5013	-5076	1.24	9A+13B+2C
S10	623	161	9308	-5678	-5764	1.49	9A+15B+2C
S11	694	176	9941	-5981	-6075	1.54	10A+17B+1C
S12	763	189	10214	-6074	-6174	1.61	11A+18B+1C
S13	805	203	10786	-6386	-6503	1.79	12A+18B+1C
S14	896	221	11560	-6941	-7074	1.88	13A+19B+1C
S15	975	234	12270	-7081	-7230	2.06	13A+21B+1C
S16	1093	251	12916	-7214	-7371	2.17	14A+22B+1C
S17	1185	263	13482	-7582	-7765	2.35	15A+22B+2C
S18	1215	274	14384	-7946	-8147	2.46	17A+24B+2C

Tablo.2. Test sonuçlarına göre uçak kombinasyonları

SONUÇ

Bu çalışmada en iyi filo rotası ve uçuş listeleri yolculuk talebi ile uçuş arzı arasındaki uyum göz önünde bulundurarak bir matematiksel modelle ifade edilerek en uygun çözümün bulunmasına çalışılmıştır. Bu model hali hazırda kullanılmakta olan ve deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilen zaman tablolarından tamamen farklı bir yapıya sahiptir. Model yaklaşımı gerçek anlamda güncel olarak faaliyet gösteren bir hava yolu şirketi (THY) verilerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar bu hava yolu şirketinin mevcut durumuyla karşılaştırılmıştır.

Tüm elde edilen ilksel veriler ile sonuç değerleri modelin ve çözüm algoritmasının hava yolu şirketlerinin günlük rutin planlamalarını yapmada son derece faydalı ve tutarlı sonuçlar vereceği yönündedir. Ayrıca, kullanılan bu model ve çözüm algoritmasının yalnızca hava yolu şirketleri için değil diğer tüm ulaştırma alanında faaliyet gösteren işletmelere uygun planlama ve çözüm sağlama konusunda yardımcı olacağı da görülmektedir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- Abara J. Applying integer linear programming to the fleet assignment problem. *Interfaces* 1989; 19:20-8.
- Ahuja RK, Magnanti TL, Orlin JB. *Network flows, theory, algorithms and applications*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- Balakrishnan A, Chien T, Wong R. Selecting aircraft routes for long-haul operations: a formulation and solution method. *Transportation research* 1990; 24B:57-72.
- Ball MO, Maganti TL, Monma CL, Nemhauser GL. *Network routing*. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 1995;8.
- Barnhart C, Johnson EL, Nemhauser GL, Savelsbergh MWP, Vance PH. Branch-and-Price: column generation for solving huge integer programs. *Operation Research* 1998;46:316-29.
- Chen HK, Chang MS, Wang CY. Dynamic capacitated user-optimal departure time/route choice problem with time window. *European Journal of Operational Research*. 2001;132:603-618.
- Clarke LW, Hane CA, Johnson EL, Nemhauser GL. Maintenance and crew considerations in fleet assignment. *transportation Science* 1996;30:249-60
- Camerini PK, Fratta L, Maffioli F. On improving relaxation methods by modified gradient techniques. *Mathematical Programming Study* 1975;3:6-25.
- Fisher ML. The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science*. 1981;27:1-18
- Hane C, Barnhart C, Johnson EL, Marstern R, Nemhauser GL, Sigismondi G. The fleet assignment problem:solving a large-scale integer program. *Mathematical Programming Study* 1995;70.211-32.
- Kennington LL, Helgason RV. *Algorithms for network programming*. New York: John Wiley, 1980.
- Powell WB. A review of sensitivity results for linear Networks and a new approximation to reduce the effects of degeneracy. *Transportation Science*. 1989;23:231-43.

Teodorovich D, Guberinic S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a Schedule perturbation. *European Journal Operational Research*. 1984;15:178-82.

Teodorovich D. *Airline Operations Research*. New York: Gordon and Breach Science, 1988.

Teodorovich D, Kremer-Nozic E. multi criteria model to determine flight frequencies on an airline network under competitive conditions. *Transportation Science*. 1989;23:14-25.

Yan S, Young HF. A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling. *Transportation Research* 1996; 30A:379-98.

Yan S. Approximating reduced costs under degeneracy in a network flow problem with side constraints. *Networks* 1996;27:267-78.

Yan S, Tu Y. Multifleet routing and multistop flight scheduling for Schedule perturbation. *European Journal of Operational Research* 1997;103:155-169.