

HAVA TAŞIMACILIĞI PLANLAMASINDA YÖNEYLEM ARAŞTIRMASI MODELLERİNİN KULLANIMI

Yrd. Doç. Dr. Aydın Ulucan

Hacettepe Üniversitesi
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi

Mehmet Eryiğit

Abant İzzet Baysal Üniversitesi
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi
Araştırma Görevlisi



Özet

Bu çalışmada, filo çizelgeleme (çizelge oluşturma ve filo tahsisi) ve tayfa çizelgeleme (tayfa eşleştirme, tayfa atama) kavramları incelenmiş ve yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Kavramlar arasındaki ilişkiler incelenerek filo tahsisi ve tayfa eşleştirme problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olan yaklaşımlardan bazıları sunulmuştur. Son olarak, tayfa eşleştirme çözüm süreci bir örnek üzerinde test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filo ataması, tayfa eşleştirme, filo çizelgeleme, tayfa çizelgeleme, filo tahsisi.

An Application of the Operations Research Methods in Airline Flight Operations Planning

Abstract

In this study, fleet scheduling (timetable construction and fleet assignment) and crew scheduling (crew-pairing and crew assignment) concepts are reviewed and previous studies on these subjects are examined. Throughout the study relationship between concepts are analyzed and some of the approaches developed for the solution of fleet and crew scheduling problems are presented. Finally, crew-pairing solution process is tested on an example.

Keywords: Fleet assignment, crew pairing, fleet scheduling, crew scheduling, fleet assignment.

Hava Taşımacılığı Planlamasında Yöneylem Araştırması Modellerinin Kullanımı

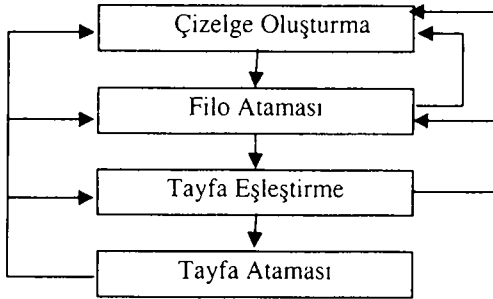
I. Giriş

Artan "hızlı ulaşım" isteği bir çok hava yolu şirketinin kurulmasına ve mevcut olan havayolu şirketlerinin de kapasitelerini artırmalarına, yeni uçak filo ağları kurmalarına sebep olmuştur. Filo sayısının, pilot sayısının, uçak tayfasının, yer personelinin, vb. gibi unsurların sayısının artması maliyetleri çok büyük rakamlara taşımıştır. Herhangi bir hava yolu şirketi, faaliyetlerini planlamada herhangi bir endüstrideki en büyük sorunlardan biri olarak kabul edilebilecek çizelgeleme problemini çözmek durumundadır. Çoğu önemli hava yolu firması aylık uçuş çizelgelemesini şu sıralamaya göre çözmeye çalışır (RUSHMEIR vd., 1997):

- a. *Pazar Planlama:* Şehirlere direk uçuşlar ve dinlenme hizmet sıklıklarının planlanması
- b. *Çizelgeleme Dizayını:* Merkez hava alanlarına uçuşların zamanlamasını içeren kalkış zamanları, gidilecek yer, uçakların kalkış yerleri temelinde uçuş tarifelerinin tasarımının yapılması.
- c. *Filo ataması:* Çizelgedeki her uçuşa uygun bir uçak tipinin atanması.
- d. *Uçak Gönderimi:* Bir gün içinde her bir uçağın uçulabileceği uçuş sıralamalarının seçilmesi.
- e. *Tayfa Eşleştirmesi:* Uçak personelinin, 1-4 günlük periyodun üzerindeki uçuşların sıralama ataması
- f. *Tayfa Blokları:* Her bir tayfa üyesi için her uçuşun aylık sınırlaması içinde tayfa eşleştirmelerinin ayarlanması.

- g. *Personel Çizelgelemesi*: Uçuş çizelgesini desteklemek için yer araç-gereçleri için uçak personeli olmayan çalışanların (yer personeli) çizelgelenmesidir.

Büyük hava yolu şirketlerinde tayfa ve uçakların çizelgelenmesi ve planlaması çok karmaşık bir görevi ifade etmektedir. Bu nedenle bu iş genellikle çeşitli planlama aşamalarına bölünerek yapılır. Planlama süreci yukarıdaki sıralamayı da kapsayacak şekilde Şekil.1'deki gibi özetlenebilir (YU, 1998). Bu şekil, bir aşamanın sonucunun sonraki için veri olarak tanımlandığı aşamaların mantıksal sırasını gösterir. Taslak planlar nihai hale ve basım haline gelinceye kadar diğer bölümlerden gelen bilgilerle bir çok kez güncellenebilirler. Bu planlar işlevsel bölümde hala değiştirilebilir niteliktedirler. Örneğin, uçuş iptal edilebilir veya ertelenebilir veya tayfalardan bir veya bir kaç hasta olabilir. Hava yolu şirketleri, tampon kaynaklar (örneğin; destek tayfa) atanarak bu problemleri çözmeye çalışır (YU, 1998).



Şekil 1: Havayolu çizelgeleme süreci

Şekil.1'deki ilk iki aşama birlikte filo çizelgeleme ve son iki aşama ise mevcut olan tayfaların uçuşlara ataması anlamına gelen tayfa çizelgeleme olarak adlandırılır. Filo çizelgelemede; havayolu şirketi hangi uçağın kullanılacağına ve nereye uçacağına karar verir. Tayfa çizelgelemesi, tayfa eşleştirme (anonim iş değişimi) ve tayfa atamasından oluşur.

Birinci işlem olarak, çizelge oluşturulur. Buradaki amaç problemdeki kısıtlar ve mevcut uçaklar ile pazarlama bölümünün beklentilerini eşleştirmektir. Buna örnek olarak, farklı hava alanlarındaki uçaklar için uygun zaman boşluklarının ayarlanması veya saptanması verilebilir. Bu sürecin çıktısı işletilmeye karar verilen uçağın uçuş ayağının kesintisiz uçuş sayısını gösterir (YU, 1998).

İkinci aşamada, uçakların uçuş ayaklarına atanmasına karar verilmelidir. Belirli bir uçuş ayağının beklenen getirisi bu uçuş ayağında kullanılan uçağın boyutuna bağlıdır (KLABJON / SCHWAN, 1999).

Üçüncü aşamada tayfa eşleştirmeleri oluşturulur. Eşleştirme aynı tayfa üssünde başlayan ve biten bir tayfa üyesi için uçuş ayakları dizisini ifade eder.

Dördüncü aşamadaki planlama problemi bireylerin daha önce yapılan eşleştirmelere atanmasıdır. Bu problem tayfa ataması veya listeleme problemi olarak ifade edilir. Amaç; iş kurallarını ve gereklerini tatmin ederek eğitim gerekleri, tatil vb. gibi bütün işi (eşleştirmeler) kapsamaktır. Böylece tayfa maliyetleri minimize edilecektir. Eğer tayfalara sabit bir ücret ödeniyorsa, tayfa üye sayısı minimize edilirken fayda maksimize edilmeye çalışılır.

Bu çalışmada özellikle ikinci aşama olan filo ataması ve üçüncü aşama olan tayfa eşleştirme problemleri sunulacak, temel modeller verildikten sonra bu alanlarda yapılan çalışmalara değinilecektir.

2. Filo Ataması Problemi (FAP):

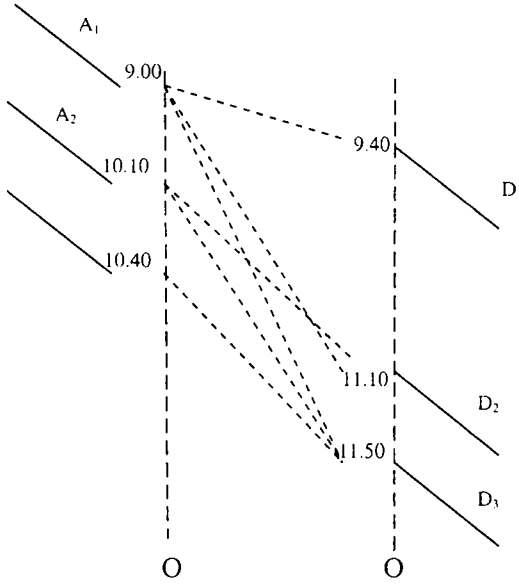
Filo ataması, çizelgelenmiş olan uçuşlara mevcut olan uçağın atanmasıdır. Tipik bir filo atama problemi, atama maliyetlerini minimize etmek veya her bir uçuştan elde edilen karı maksimize etmeyi amaç edinir. Bu amaca, beklenen kazançta artış (örneğin, yüksek talepli uçuş ayaklarına büyük uçakların atama yapılması) sağlayarak ve uçuş ile ilgili harcamaları (örneğin; yakıt, personel ve bakım ile ilgili maliyetler) azaltarak ulaşılabilir. Filo atama problemi, başlangıç atamasının verildiği sıcak başlangıç (warm start) veya başlangıç atamasının verilmediği sadece filo boyutu, uçak tipleri ve yolcu taleplerinin bilindiği soğuk başlangıç (cold start) olarak sınıflandırılmaktadır (ANTOINE et al., 2004).

FAP modelleri; Abara (1989), Gu ve diğerleri (1993), Hane ve diğerleri, (1995), Sakkout (1996), Rushmeier ve Kontogiorgis (1997), Gopalan ve diğerleri, (1998), Götz ve diğerleri, (1999), Jin ve Powel (2000) ve Antoine ve diğerleri (2004) tarafından incelenmiş ve farklı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir.

Abara (1989) modelini kar maksimizasyonu şeklinde oluşturmuştur. Model formüle edilirken, kısıtlar temelde dört grupta toplanmıştır. Bunlar; uçuşların kapsanması, malzemelerin sürekliliği, çizelgeleme dengesi ve uçak sayısı hesaplanması şeklindedir.

Herhangi bir istasyona gelen her uçak belirli bir minimum zaman aralıklı (örneğin 40 dakika) kalkış zamanına sahip olan uçuş ile bağlantı kurabilir.

Tipik olarak bir istasyona gelen her uçak geliş saatinden sonra gerçekleşecek olan herhangi bir uçuş ile bağlantı kurabilir (Şekil.2, ABARA, 1989).



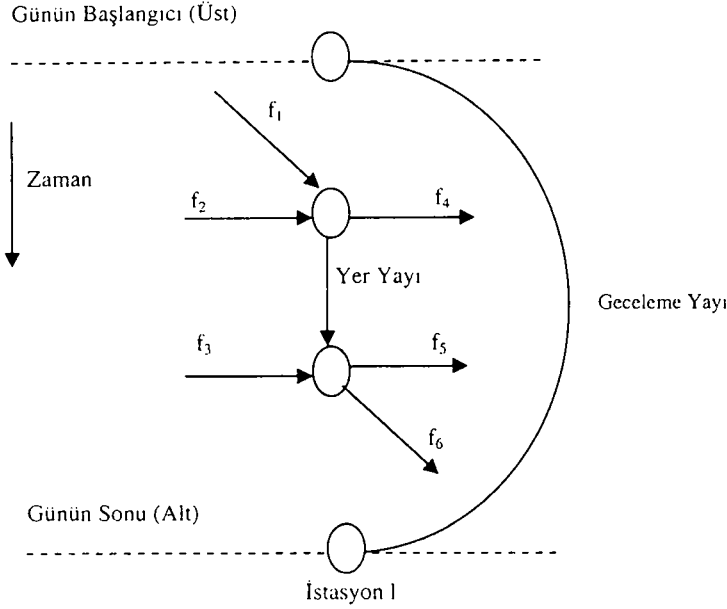
Şekil 2: A₁, A₂, A₃ gelen uçuşlar ve D₁, D₂, D₃'ün giden uçuşlar olduğu yerdeki uygun dönüşlerin gösterimi.

Kaynak: Abara, J. (1989). *Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem*, INTERFACES 19:4 July-August (pp. 20-28).

Her uçak için yere iniş zamanı olarak verilen minimum 40 dakikalık süre, uçak tipi başına 12 dönüş değişkeni oluşturur. Bunlar; gelen-giden dönüşleri (A₁-D₁, A₁-D₂, A₁-D₃, A₂-D₂, A₂-D₃), sonlandırılan dönüşler (A₁-O, A₂-O, A₃-O) ve başlatılan dönüşlerdir (O-D₁, O-D₂, O-D₃).

Uçuşların birden fazla sayılmalarını önlemek amacıyla, her uçuşa birden fazla hizmet edilmemesi için modele kısıtlar eklenmelidir. Diğer bir ifade ile, bir uçağın etkinleştirilebilecek olası dönüşlerinin birden fazla olamaması gerekir.

İstasyon ve yollar arasındaki ilişkileri daha net görebilmek amacıyla Şekil.2'de şebeke gösterimi verilmiştir. Burada istasyondaki dönüş düğümü gelen ve giden uçuşlar arasındaki ilgili olasılıkları belirtir (GOPALAN, vd. 1998). Eğer ayrılan uçuşun ayrılma zamanı ulaşan uçuşun uygun zamanından daha büyükse gelen uçuş ayrılan uçuşa dönebilir.



Şekil 3: İstasyon I'deki uçuş, yer ve geceleme yayları

Kaynak: Gopalan, R., ve Talluri, K. T. (1998), *Mathematical models in airline Schedule planning: A survey*, *Annals of Operation Research*, 76, pp. 155-185.

Abara (1989) tarafından sunulan filo atama modeli aşağıdaki gibidir.

Modelin kullandığı parametreler;

X_{ijk} : uygun dönüşler (uçak tipi k'daki uçuş ayağı j için uçuş ayağı i'nin dönüşü; eğer $i = 0$ ise, j başlangıç dizisidir; eğer $j = 0$ ise i sonlandırıcı dizisidir. Dizi, bir uçak için günlük rotalamayı ifade eder).

e_k : belirlenmiş sayının ötesinde kullanılan ekstra tip k uçağı

M_k : tip k'nın mevcut uçakları

P_{jk} : uçak tipi k'nın uçuş j'de kullanılmasının getirdiği kar veya fayda

O_{sk} : istasyon s'de uçak tipi k'nın dizi başlatma eksikliği

T_{sk} : istasyon s'de uçak tipi k'nın dizi bitirme eksikliği

Y_{sk} : istasyon s'de uçak tipi k'nın hizmet veya / hizmet etmeme göstergesi

C_1 : kullanılan uçak başına düşen nominal maliyet

C_2 : kullanılan ekstra uçak başına büyük maliyet (= 800,000 USD)

F : uçuşların sayısı

K: uçak tipi sayısı

S: istasyon sayısı

G_k: filo *k* için istasyonların grubu

L_k : istasyon grubundan gelmek zorunda olan filodaki gecelerin (*overnights*) yüzdesindeki alt sınır. Overnight, bitim dizisine eşittir.

A_s: istasyon *s*'ye gelenler seti

D_s: istasyon *s*'den ayrılanlar seti

AD_s: istasyon *s*'ye ulaşan ve ayrılanların birleşik seti

CS_k : uçak tipi *k* tarafından hizmet edilen her bir istasyon için empoze edilen (ceza veya ödül) maliyet

$$X_{ijk} = 0, 1$$

$$Y_{sk} : 0, 1$$

$$O_{sk}, T_{sk} = 0, 1, 2, \dots$$

Kısıtlar;

Uçuş kapsamı:

$$\sum_{i=0}^F \sum_{k=1}^K X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i$$

Teçhizatın sürekliliği

$$\sum_{i=0}^F X_{ilk} = \sum_{j=0}^F X_{ljk} \quad \forall l, k \text{ için}$$

Çizelge Dengesi

$$\sum_{i \in D_s} X_{oik} + O_{sk} + \sum_{i \in A_s} X_{ioi} + T_{sk} \quad \forall s, k \text{ için}$$

Uçak Sayma (Aircraft count)

$$\sum_{i=1}^F X_{oik} - e_k = M_k \quad \forall k \text{ için}$$

Bazı işlevsel kısıtlar;

Bir grup istasyon için geceleme uçak sınırlaması

$$100 \sum_{s \in G_k} \sum_{i \in A_s} X_{ioi} \geq L_k \sum_{i \in A_s} X_{ioi} \quad \text{veya}$$

$$(100 - L_k) \sum_{s \in G_k} \sum_{i \in A_s} X_{iok} - L_k \sum_{s \in G_k} \sum_{i \in A_s} X_{iok} \text{ etkilenen } \forall k \text{ için}$$

istasyonlar için yuva (slot) sınırlamaları

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in G_k} \sum_{j=0}^F X_{ijk} / (t_1 \leq A_i \leq t_2) \leq U \text{ etkilenen her } k \text{ ve her zaman aralığı}$$

$(t_1-t_2) : A_i : \text{ulaşım zamanı}$

t_1 ve t_2 : zaman aralığı ve U – her uçak için tanımlanan üst limit.

Hizmet verilen istasyon sayısındaki sınırlamaya ilişkin kısıtlar;

- a. Bir istasyondan veya istasyona gerçekte atanan uçuşların sayısı o istasyonda izin verilen sayıyı geçemez.

$$\sum_{i,j \in AD_k} X_{ijk} (\text{atanan}) \leq Y_{sk} \sum_{i,j \in AD_k} X_{ijk} (\text{izin verilen})$$

eğer $LS_k > 0$ veya $CS_k \neq 0$

- b. Eğer uçak tipi k bir istasyona hizmet ediyorsa, daha sonra uçak tipi içinde içine veya ondan en az bir uçuş olmak zorundadır.

$$\sum_{i,j \in AD_k} X_{ijk} \geq Y_{sk} \text{ Eğer } LS_k > 0 \text{ ise, ve kesin bir sayı değeri veya daha}$$

düşük bir sınır sunar veya $CS_k \neq 0$

- c. Bu kısıt, istasyonlardaki sınırlamalar maliyetlerden daha ziyade kesin sınırlar tarafından etkileniyorsa uygulanır.

$$\sum_s Y_{sk} \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} LS_k \text{ eğer } LS_k > 0$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \sum_{i=0}^F \sum_{j=0}^F \sum_{k=1}^K P_{jk} X_{ijk} - C_1 \sum_{i=1}^F \sum_{k=1}^K X_{oik} - C_2 \sum_{k=1}^K e_k \\ &- C_3 \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K (O_{sk} + T_{sk}) - \sum_k CS_{sk} \sum_s Y_{sk} \end{aligned}$$

Gopalan ve diğerleri, (1998), günlük filo atama problemini çözmek amacıyla Abara (1989)'dan farklı küme kapsama tipi bir tamsayı programlama modeli sunmuştur.

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } \sum_{i \in m} \sum_{j \in E} c_{ij} x_{ij}$$

St.

$$\sum_{j \in E} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in L$$

$$\sum_{i \in I(n)} x_{ij} - \sum_{i \in O(n)} x_{ij} = 0 \quad \forall n \in N, j \in E$$

$$\sum_{i \in O} x_{ij} \leq C(j) \quad \forall j \in E,$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in m, j \in E$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in m, j \in E$$

Bu formülasyona ait parametreler aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

N (1, ..., n) : günlük çizelgelemeyi temsil eden uçuş ağının düğümleri

L (1, ..., l) : uçuş ayakları ile ilişkili olan ağ yayları

G (1, ..., g) : yer yayları

O (1, ..., o) : geceleme yayları

M (1, ..., m) : bütün yay setleri

E (1, ..., e) : Araç tipi (filo tipi)

C_j : Araç tipi j ∈ E 'nin filosundaki uçak sayısı

I(n) : n ∈ N düğüm için, n'e gelen yaylar seti

O(n) : n'den ayrılan yaylar seti

C_{ij} : Araç tipi j'nin yay i'ye atanmasındaki maliyet.

F'de olamayan yaylar için, maliyet sıfır olarak düşünülür. F'yer alan yaylar için maliyetler, araç tipi j'deki uçuş ayakları ve kapasitenin eksikliğine rağmen gelmeyen yolcuların "fırsat maliyetlerinin" olduğu uçuşların operasyonel maliyetleridir.

Uçuş yayı i ∈ L ve araç tipi j = 1, ..., e için karar değişkeni x_{ij}'dir.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer araç tipi j, yay i'ye atanırsa} \\ 0 & \text{Aksi durum} \end{cases}$$

Yay $i \notin L$ için x_{ij} , geceleme uçak sayısını veya araç tipi j 'nin yerdeki uçak sayısını ifade eder. Rastsal olarak alınacak bir zaman kesitinde havadaki ve yerdeki uçakların sayısını hesaplama olasıdır.

Bir sonraki aşamada tayfa çizelgeleme ve araç bakımını kolaylaştırmak amacıyla filo atama problemine bazı kısıtlar eklenebilmektedir. Bu kısıtlardan bazıları; pilotların, kabin personelinin ve diğer tayfaların günlük çalışma, dinlenme vb. gibi zaman dilimlerini düzenleyen yasal kısıtlamalardır. Pilotlar bir sonraki uçuşa devam etmeden önceki gece minimum bir dinlenme süresine (genellikle yaklaşık olarak 10 saat) sahip olmalıdırlar.

Filo Atama Problemi ile ilgili yapılan uygulamalardan bazıları Tablo.1'de verilmektedir. Tablo oluşturulurken uygulamada kullanılan çözüm yaklaşımları ve problem özellikleri açıklanmıştır.

Tablo.1. Filo Atama Problemi ile ilgili yapılan çalışmalar.

Model - Yazar	Çözüm Yaklaşımı	Problem ve Çözüm Süreci
FAP (Filo Atama problemi – Abara, 1989) Götz ve diğerleri, 1999	Çözüm Yaklaşımı 3 aşamadan oluşmaktadır: önceki süreç, Sezgisel Yaklaşım, sonraki süreç	Sezgisel yaklaşım ile çalışan model LP ve IP yaklaşımlarıyla karşılaştırıldığında daha kısa zamanda daha yüksek kaliteli çözümler sunmaktadır.
FAP, Hane et. al., (1994)	Kullanılan model; çok akıllı şebeke problemidir.	Çalışma basit günlük, yerel filo atama problemini tanımlar ve verimli bir şekilde çözüm getirebilmek için ardışık adımlar olarak bazı adımlar önerir.
Slakkout ve diğerleri, (1996)	Kısıt Mantık Programlama (CLP)	Uçuşların önceden tanımlanmış çizelgelemesine farklı tiplerde uçak setlerinin atanması ile ilgilenilmiştir. Kısıt mantık programlama temelli optimizasyon metodu (dal-sınır optimizasyonu, karışık tamsayı programlama) çözüm geliştirme için kullanılmıştır.
FAP Optimizasyonu Rushmeier ve, (1997)	Karışık tamsayı, çok akıllı yapı olarak formüle edilmiştir.	Bu çalışmada, doğru olarak karmaşık işlevsel kuralları yakalarken, uçuş bağlantı olasılıklarını tam olarak temsil etmeye odaklanılmıştır. Bu doğrultuda model oluşturulmuş ve çözüm aranmıştır. Çizelgelemelerle elde edilen sonuçlar yüksek kalitede atamaların yapıldığını göstermiştir.

Kontogiorgis ve Acharya (1999)	Uzmanlaştırılmış filo atama modeli	Makalede, hafta içi filo atama çizelgelemesine oranla daha zor olan hafta sonu çizelgelemesi üzerinde durulmuştur. Hafta sonu gerçekleşen farklı talepleri karşılarken havaalanı olanaklarını yeniden sıraya koymanın maliyetini minimize etme zorunluluğu vardır. US havayolları çizelgeleme planlamacılarını desteklemek amacıyla uzmanlaştırılmış filo atama modeli geliştirilmiştir.
Ioachim, ve diğerleri, (1999)	Dantzig-Wolfe Ayrıştırması	Bu çalışma, filo ataması ve listeleme problemleri ile ilgili kısıtların yeni bir tipini sunmaktadır. Sayısal deneyler, Avrupa Havayollarından gelen çizelgeleme problem verisi ve haftalık filo rotalaması kullanılarak yapılmıştır.
Rexing, ve diğerleri, (2000)	Matematiksel programlama teknikleri	Uçak tiplerinin uçuşlara eş zamanlı olarak atanması ve uçuş ayrılışlarını çizelgelemek için geliştirilmiş filo atama modeli sunulmuştur. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için iki algoritma geliştirilmiştir.
Hjorring, Karisch ve Kohl (2000)	Tamsayılı doğrusal programlama	Makale, çözüm kalitesi, modelin doğrulanması ve çözüm zamanı gibi üç farklı bakış açısını birleştirir. Bu bakış açıları, problemin etkin ve verimli çözümünde hayati öneme sahiptir. Makale son zamanlarda Carmen sistemlerinin tayfa eşleştirme problemlerindeki gelişmeleri özetleyerek Carmen kural dili RAVE ile optimizasyon teknolojisi birlikte kullanılarak çözüm aranmıştır.
Grönkvist (2000)	Çok akışlı ağ problemi	Filo ataması ve uçak rotalama problemlerinin çözüm metodları ve formülasyonları tartışılmış ve bu alandaki çalışmalar incelenmiştir. Sonuca fazla yoğunlaşmaksızın problem formülasyonu ve çözüm metodları üzerinde yoğunlaşmıştır.
Kilborn, E., (2000)	Kısıt Programlama yaklaşımı ile uçak çizelgeleme	Çalışma ile filo atama problemini, kısıt programlama kullanarak modelleme ve çözmek için bir yol sunulmuştur. Bu çözüm metodu, gerçek problemlerin daha hızlı ve daha kaliteli bir şekilde çözümünü

		sunar. Model ile, 17 uçaklı bir filonun ve 3000'in üzerinde uçuşa atanması ile ilgili bir aylık çizelgeleme probleminin çözümü bir dakikadan daha az sürede bulunmuştur. Bulunan çözüm optimal çözüm değil daha sonraki optimizasyon problemlerinin başlangıcı olarak kullanılmıştır. Çözüm metodu ILOG çözücüde kullanılmıştır.
Filar, Manyem ve White (2001)	Matematiksel programlama teknikleri	Yöneylem araştırma tekniklerinin havayolu çizelgemelerinde uygulaması yapılmıştır. Uçuşlardaki küçük bir varış gecikmesi bir çok zincirleme olaya sebep olmaktadır. Makalede, bu tür bozulmalar ile ilgili son zamanlardaki çalışmalar incelenmiştir.
Barnhart, Kniker ve Lohatepanont (2002)	Matematiksel programlama teknikleri	Uçuş ayaklarına uçak tiplerinin atanmasıyla kar maksimizasyonunu içeren filo atama probleminin çözümü için yeni bir formülasyon ve çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Büyük Amerikan hava yolu şirketlerinin verileri üzerinde çalışmalar yapılmış ve üstün çözümler üretilmiştir.
Leeuwen, Hesselink ve Rohling (2002)	Kısıt problemi	Uçaklar için havaalanı ayrılma çizelgeleme aracı kısıt tatmin teknikleri temelinde dayandırılmıştır. Havaalanlarında yaşanan tıkanıklıkları azaltma olasılığı uçakların çizelgeleme süreci planlamasındaki kontrollerle yardım etmek içindir. Problem kısıt tatmin problemi olarak modellenmiş ve ILOG solver kullanılarak çözülmüştür.
Filo çizelgeleme, Yan ve Tseng (2002)	Algoritma, Lagranj Raahtlatma, ağ simpleks metodu ve en az maliyet akış artırma algoritması temelinde dayandırılmıştır.	Uygun tarifelerle ve daha iyi filo rotasını bulmak amacıyla eş zamanlı taşımalara yardımcı olacak bir çözüm algoritması ve modeli geliştirilerek uygulanmıştır. Tayvan havayolları operasyonlarına uygulanan bu örnek olay sonucu modelin iyi çalıştığını göstermiştir.
Klabzan, 2003	Optimizasyon Modelleri	Sofistike optimizasyon modelleri ve algoritmaları gözden geçirilmiş ve çözüm metodolojileri vurgulanmıştır. İşlevsel süreçler kadar stratejik işletme süreçlerini de içeren modeller üzerinde odaklanılmıştır. Düzensiz işlemler ile de ilgilenilmiştir.

Antoine ve diğerleri, (2004)	Ortak zeka (COIN) kullanımıyla filo ataması	COIN (collective Intelligence), veri toplama, kaynak dağıtım hesaplaması ve ağ gönderimini içeren optimizasyon problemlerine başarıyla uygulanmıştır.
Lohatepanont ve Barnhart (2004)	Entegre matematiksel programlamalar	Makale filo ataması ve çizelge tasarımı içeren havayolu çizelgele planlama sürecinin aşamaları üzerine odaklanmıştır. Kazancı maksimize edecek ve gideri minimize edecek filo atamasının oluşturulması üzerinde durulmuştur. Büyük bir ABD hava yolu verileri temeline daya ilk sonuçlar önemli getirilerin elde edileceğini göstermiştir.

3. Tayfa Eşleştirme Problemi:

Tayfa eşleştirmede amaç; bütün yasal kriterlerini karşılayarak (görevler ve dinlenmeler), uçuş çizelgelerinin tamamen kapsanarak kaynakların optimal kullanımı sağlanarak ve yüksek kalitede çözümler üreterek maliyetleri minimize etmektir.

Tayfa eşleştirme probleminde temel sorun ve düşünülmesi gerekli ana kısıtlar; pilot, kabin görevlileri ve diğer tayfalarla ilişkili olan uluslar arası ve yerel yasal düzenlemeler, havayolu şirketinin kendi iç düzenlemeleri gibi hususlardır. Bu yasal düzenlemeler, her bir pilotun veya tayfaların bir görev periyodunun uzunluğunun ne kadar olacağını, dinlenme aralıklarının ve süresinin, minimum ne kadar olacağını belirler. Makalede kullanılacak iki önemli tanım vardır (Kövari, 2002).

Uçuş Zamanı: Blok zaman; durmaksızın bir yerden başka bir yere ulaşımında geçen süredir.

İşgücü zamanı: Uçuş zamanı + iş için raporlama zamanı + eğitim + ... vb. Örneğin; ayrılmadan önce, iş için rapor zamanı 70 dakikadır.

Tayfaların ayarlanması bir çok farklı faktörden etkilenebilir. Bunlar; tayfa istekleri, tayfa ikametgah yeri, hangi hava alanında otele ihtiyaç olacağı, değişken ve beklenmedik uçuşlar, önceden belirlenmiş eşleştirmeler, pilot ve diğer kabin görevlilerinin yalnızca belirli tip bir uçağı kullanabilmeleri, tayfalar arasında eşit iş yükü dağılımının sağlanması, vb. faktörlerdir.

Tayfa eşleştirme problemi; Anbil et, al., (1991), Anbil et, al., (1992), Clarke ve diğerleri (1995), Wei, Yu ve Song (1997), Yu (1998), Klabjan et, al., (1999), Kohl (1999), Desrosier et, al., (2000), Ernst , ve diğerleri, (2001),

Kövari (2002), Kohl ve Karisch (2004), çalışılmış ve optimizasyon modeli temelinde farklı çözüm algoritmaları sunulmuştur.

Yu (1998) basit bir küme kapsama formunda doğrusal programlama ile tayfa eşleştirme problemini aşağıdaki şekilde göstermiştir;

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min} \sum_{p \in P} c_p x_p$$

$$\text{st.} \sum_{p \in P} a_{ip} x_p = n_i \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{p \in P} a_{jp} x_p \leq m_j \quad \forall j \in J$$

$$x_p \geq 0 \text{ ve tamsayı}$$

Yukarıdaki formülasyonda kullanılan parametreler şu şekilde tanımlanmıştır;

P: uygun eşleştirmeler seti

x_p ($p \in P$) eşleştirme p 'nin kaç kez kullanıldığını belirlemeyen tamsayı karar değişkeni

c_p : eşleştirme p 'nin maliyeti

Amaç; kullanılan eşleştirmelerin maliyetini minimize etmektir. Uçuş ayaklarının seti I ile ifade edilmektedir ve eşleştirme p uçuş ayağı $i \in I$ yı a_{ij} kadar kapsar. n_i , Uçuş ayağı i 'nin kapsanmak zorunda olan zaman sayısını ifade eder. Kokpit personeli için bu değer 1'dir fakat kabin görevlileri için bu değer beklenen yolcu sayısına, uçuş ayağının önceliklerine ve diğer hususlara bağlıdır. Birinci kısıt her bir uçuş ayağının tam olarak istenen zaman sayısı ile kapsanmak zorunda olduğunu gösterir. Bu durumda Küme Kapsama tipi problem (COPPARA vd, 2000) elde edilir. Gerçek hayat uygulamalarında Küme Kapsama modeli tayfa eşleştirme probleminin bütün önemli kısıtlarını içermez. Bu nedenle, formülasyona başka kısıtlar da eklenir.

Tayfa eşleştirme ve atama modeli olarak kullanılacak Küme Kapsama modelinin genelleştirilmiş hali Konl (1999) tarafından aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$\text{Min} \sum_{i \in I} c_i x_i$$

s.t

$$\sum_{p \in I} a_{ij} x_i = 1 \quad \forall j \in L$$

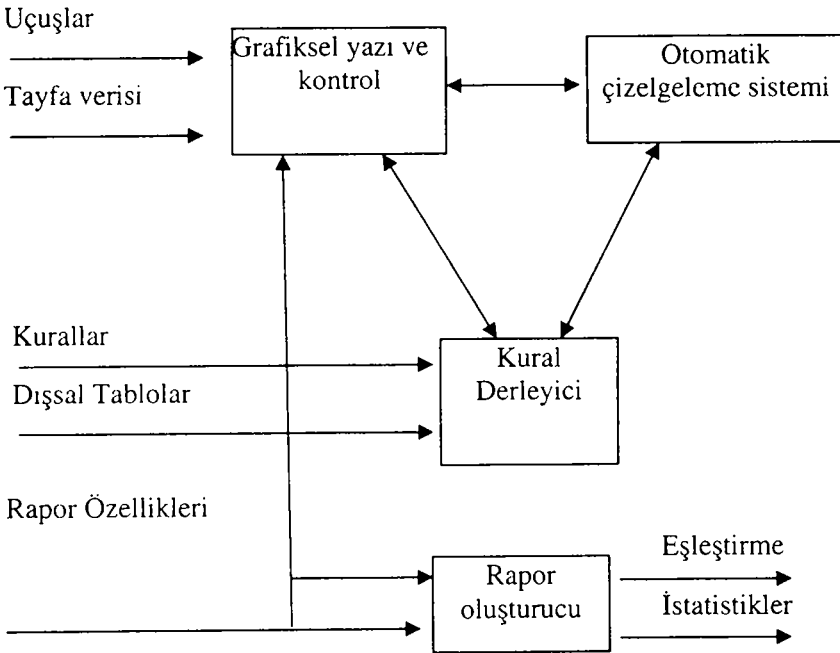
$$\sum_{p \in P} a_{ik} x_i = b_k \quad \forall k \in K$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad x_{ik} \in \{0,1\}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Eğer liste } i \text{ tayfa } j \text{ için üretilmişse} \\ \text{Aksi durum} \end{array}$$

$$a_{ik} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Eğer eşleştirme } k \text{'yi kapsıyorsa} \\ \text{Aksi durum} \end{array}$$

İkinci kısıt J ile ifade edilen diğer global kısıtların setini gösterir. Bunlar, belirli sınırlar içinde olan her bir temelin temel iş yükü gerektiren temel kısıtlar olabilir. Bu durumda; bip , eğer eşleştirme p kullanılıyorsa kısıt j ile ilgili olarak temele atanan edilen iş yüküdür. m_j , olası maksimum iş yükünü ifade eder.



Şekil 4: Carmen Sistemi

Kaynak: Yu, G. (ed.), (1998). *Operation Researches in the Airline Industry*, Austin, USA.

Tayfa eşleştirme problemleri için sunulan “Carmen sistemi”nde (Şekil.4) algoritma bir başlangıç çözümünün varlığını varsayar (KONL, 1999). Böylece;

- Mevcut çözümdeki değişkenlerin bazıları sabitlenir,
- Bütün olası eşleştirmeler / listelemeler türetilir,
- Doğrusal tamsayı programlaması çözülür.

Tayfa Eşleştirme ile ilgili yapılan uygulamalardan bazıları Tablo.2’de verilmektedir. Tablo oluşturulurken uygulamada kullanılan çözüm yaklaşımları ve problem özellikleri açıklanmıştır.

Tablo.2. Tayfa Eşleştirme ile ilgili yapılan çalışmalar.

Model - Yazar	Çözüm Yaklaşımı	Problem ve Çözüm Süreci
Kakas ve Michael, (1998)	Mantıksal Programlama	Sistem, tayfa çizelgeleme ve yeniden çizelgeleme görevlerinde yüksek düzeyde esneklik sunmaktadır. Bu, geçerli ve iyi kalitede çözüm geliştirmek amacıyla kullanılabilir ve problemin ekstra gereksinimlerini karşılamak için bu çözümü daha saf bir hale getirmek ve düzenleyerek bu işi yapana yardım eder. Model Kıbrıs Havayollarında uygulanmıştır.
Tayfa Eşleştirme, Kohl (1999)	Tayfa çizelgeleme için doğrusal tamsayı programlaması	Tayfa çizelgelemesi için sunulan Carmen sitemi; üç aşamalı (bazı eşleştirmelerin tayfa üyelerine atanması, bütün olası eşleştirmelerin oluşturulması ve doğrusal tamsayı programının çözülmesi) bir karışık tamsayı programlama-sını kullanır. Algoritma başlangıç çözümünün olduğunu varsayar.
Alefragis, ve diğerleri, (2000)	0-1 tamsayı doğrusal programlama çözümü için sezgisel yaklaşım temelli <i>Lagranj Rahatlatımı</i>	Makalede, 0-1 tamsayı doğrusal programlama çözümü için sezgisel yaklaşım temelli <i>Lagranj Rahatlatımı</i> modelinin hava ve demir yolu tayfa çizelgeleme problemleri için uygulamalarına bakılmıştır.
Desroseier ve diğerleri, (2000)	Ad Opt’un GERAD ile ortaklığı sonucunda ortaya çıkan ALTITUDE programının uygulanabilirliği araştırılmıştır.	Air Transat tarafından kullanılan ALTITUDE üç modüllü (uçak rotalama, tayfa eşleştirme, aylık iş ataması) bir optimizasyon paketi olarak sunulmuştur. Bu sistem ile planlama döngüsü azaltılarak, işlevsel esneklik artırılarak ve destekleyici pazarlama faaliyetleri sonucu firma, Kanada’nın en büyük “charter” firması durumuna gelmiştir.

Rosenberg, ve diğerleri, (2000)	SimAir (simülator programı)	SimAir, yerel bir hava yolunun günlük faaliyetlerini simüle eden modüler bir hava yolu simülasyonudur. Makalede, SimAir'in yapısı tanımlanarak belirsizlik altında hava yolu planlamasının çalışması için gelecek yönlendirmeler verilmiştir.
Klabzan (2001)	Kullanılan algoritma iki aşamalıdır. 1. aşama LP-'ı çözer, 2. aşama tamsayı çözüm bulmaya çalışır	Büyük boyutlu tayfa çizelgeleme problemlerini çözmek için, rasgele eşleştirme oluşturma ve güçlü dallanma geliştirilmiştir. Kullanılan algoritma mevcut kullanılanlara oranla önemli derecede daha iyi çözümler sunmuştur.
Ernst ve diğerleri, (2001)	Tayfa çizelgeleme ve listelemeyi çözmek amacıyla tam bir optimizasyon modeli kurulmuştur.	Planlama aşamasında tren tayfa yönetiminin optimizasyonu ile ilgilenilmiştir. Normalde tayfa yönetimi iki aşamalı bir süreçtir. Tayfa çizelgeleme ve tayfa listeleme. Tayfa çizelgeleme ve listeme işlemini çözecek tam bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Sayısal deneyler pratik uygulamadan çıkan veri setlerinden toplanmıştır.
Ekenbäck (2002)	Kısıt mantık programlama (CLP)	Bir ay süresince birlikte çalışılacak olan kabin görevlisi gruplarının nasıl oluşturulacağı ile ilgili çalışılmıştır. Problem çözmek için Kısıt mantık programlama (CLP) temelinde uygulanmıştır. Matematiksel optimizasyon problemlerinin tayfa gruplarının oluşturulmasını geliştirip geliştirmedeği sorgulanmıştır.
Fahle, ve diğerleri, (2002)	Dinamik Programlama	Havayolu tayfa atama problemi, kısıtlı en kısa yol problemi olarak adlandırılır ve dinamik programlama ile çözülür. Makalede bir alt problem, kısıt tatmin problemi olarak formüle edilmiştir.
Kohl ve Karish (2004)	Matematiksel Programlama teknikleri	Gerçek dünyadaki havayolu tayfa listeleme problemlerinin detaylı tanımlamaları verilmiş ve hava yolu endüstrisinde bulunan amaçlar ve çeşitli kısıtları çözebilmek amacıyla farklı modeller kullanılmıştır. İkinci olarak ticari amaçlı bir tayfa listelemede çalıştırılan çözüm metotları sunulmuştur.

Tayfa Eşleştirme Örneği:

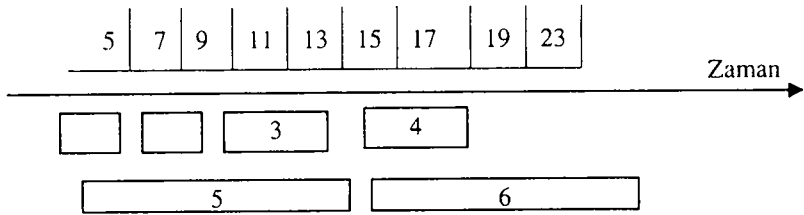
Bu kısımda tayfa eşleştirme probleminin modelleme süreci basit bir örnek üzerinde sunulmuştur. Problemin amacı, bütün uçuşlar için uygun tayfaların atanmasıdır. Bu yaklaşım, eğer çizelgeleme her gün için aynı ise mükemmel bir şekilde uygulanabilir. Yaklaşım farklı durumlar için de temel bir

başlangıç için iyi çözümler sağlayabilir. Tablo.3'de altı adet uçuşun özellikleri verilmiştir.

Tablo.3: Altı uçuşlu günlük problem

Uçuş	Başlangıç	Bitiş	Ayrılma zamanı	Varış zamanı	Uçuş zamanı
1	A	B	5.00	7.00	2
2	B	A	7.30	9.30	2
3	A	B	11.00	13.00	2
4	B	A	15.00	17.00	2
5	C	A	6.00	14.00	8
6	A	C	15.00	23.00	8

A ve C arasındaki uzaklık uzun olmasından dolayı iki tayfaya ihtiyaç vardır. Çünkü A'dan C'ye gidiş ve dönüş 12 saatten fazla süre almaktadır. Şekil.5 uçuşlar Gantt diyagramı ile gösterilmiştir. Zaman çizgisi altında yer alan dikdörtgenler içerisinde yer alan rakamlar uçuş numaralarını göstermektedir.



Şekil 5: Örnek uçuşların GANTT diyagramı ile gösterimi

Tablo.4'de uçuşlarla tayfaların olası tüm eşleştirmeleri gösterilmektedir.

Tablo.4: Bütün Olası Eşleştirmeler

Numara	Uçuş (X_p)	Maliyet (C_p)	Numara	Uçuş (X_p)	Maliyet (C_p)
P ₁	5 - r - 6	2	P ₁₀	1 - r - 2	2
P ₂	5 - r - 1 - 2 - 3	2	P ₁₁	1 - r - 4	2
P ₃	5 - r - 3 - 4	2	P ₁₂	2 - 3	1
P ₄	5 - r - 1 - 2	2	P ₁₃	2 - r - 3	2
P ₅	6 - r - 5	2	P ₁₄	1 - r - 2 - 3 - 4	2
P ₆	5 - r - 3	2	P ₁₅	1 - 2 - 3 - r - 2	2
P ₇	1 - 2 - 3 - 4	1	P ₁₆	1 - 2 - 3 - r - 2 - 3 - 4	2
P ₈	4 - r - 6	2	P ₁₇	3 - r - 2	2
P ₉	1 - 2 - 3 - 4 - r - 6	2	P ₁₈	3 - r - 2 - 3 - 4	2

Eşleştirmelerde kullanılan r dinlenme için ayrılan zaman veya uçuş ayağının değişmesini ifade etmektedir.

Tablo.3’de gösterilen olası bütün eşleştirmeler için kullanılan değişkenler X_1, \dots, X_{18} dir. Kullanılan X_p ($p = 1, \dots, 18$) değişkenleri, eğer tayfa her gün kullanılırsa 1 değerini alır. Aksi durumda 0 değerini alacaktır. Her bir tayfanın uçuş ayaklarında görevlendirilmesindeki maliyetlerin eşit ve 1 \$ olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle; her bir eşleştirme değişkeninin toplam maliyeti kullanılan tayfa sayısına (C_p) eşittir.

Tablo.3’e göre amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\text{MIN } 2 X_1 + 2 X_2 + 2 X_3 + 2 X_4 + 2 X_5 + X_6 + X_7 + 2 X_8 + 2 X_9 + 2 X_{10} + 2 X_{11} + X_{12} + 2 X_{13} + 2 X_{14} + 2 X_{15} + 2 X_{16} + 2 X_{17} + 2 X_{18}$$

Her uçuşun kesinlikle bir kez kapsanacağı kısıtlar aşağıdaki gibi yazılabilir. Tablo.3’e göre bütün uçuşlar için atanmış tayfa belirlenmek zorundadır.

SUBJECT TO

$$\text{Uçuş 1: } X_2 + X_4 + X_7 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{14} + X_{15} + X_{16} = 1$$

$$\text{Uçuş 2: } X_2 + X_4 + X_7 + X_9 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + 2 X_{15} + 2 X_{16} + X_{17} + X_{18} = 1$$

$$\text{Uçuş 3: } x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + 2x_{16} + x_{17} + 2x_{18} = 1$$

$$\text{Uçuş 4: } x_3 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{14} + x_{16} + x_{18} = 1$$

Uçuş 5: $x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 = 1$

Uçuş 6: $x_1 + x_5 + x_8 + x_9 = 1$

INT 18

END

Model herhangi bir LP çözücüsünde çözüldüğünde $X_1 = X_7 = 1$ olarak bulunmuştur. $X_1 = 1$ olması Tablo.4'deki birinci eşleştirmenin seçilmesini ifade eder. $X_7 = 1$ olması durumu ise yedinci eşleştirmenin seçildiğini göstermektedir. Bu durumda A havaalanında bulunan iki tayfadan biri C'ye diğeri B'ye giden uçuş ayaklarına atanmış olacaktır. Bu örnekte günlük kullanılan tayfa sayısı, diğeri bir ifade ile maliyetler toplamı $\sum_p c_p x_p = 2x_1 + 1x_1 = 3$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda bir tayfa C havaalanından, diğeri iki tayfa ise A havaalanından diğeri olan uçuş ayaklarına atanacaktır.

4. Sonuç ve Yeni Çalışmalar:

Bu çalışmada havayolları taşımacılığı planlamasında yöneylem araştırması modellerinin kullanımı sunulmuştur. Havayolları taşımacılığı planlamasının iki temel problemi olan filo ataması ve tayfa eşleştirme problemlerinin tanımlanması, modellerinin sunulması ve çözüm süreçlerinin tartışılması makalenin özünü oluşturmaktadır.

Her iki problem ile ilgili literatürde yer alan uygulamaların ve çözüm yaklaşımlarının verilmesi ile problem ülkemizde tanıtılmaya çalışılmıştır. Yöneylem Araştırması teknikleri ile hava taşımacılığı planlaması, üzerinde yoğun olarak çalışılan bir konu olma özelliğini artırarak sürdürmektedir. Üzerinde çalışılan iki yeni genişleme alanı olarak gerçek hayat kısıtlarının modellere dahil edilmesi ve çözüm algoritmalarının hızlandırılması sayılabilir. Ülkemiz açısından bunlara ek olarak, modellerin havayolu işletmelerinde uygulanması da potansiyel bir çalışma alanı olarak dikkat çekmektedir.

Kaynakça

- ABARA, J. (1989), "Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem," *Interfaces*, 19/4 (July-August): 20-28.
- ALEFRAGIS, P. vd. (2000), "Parallel Integer Optimization for Crew Scheduling," *Annals of Operations Research* 99.
- ANBİL, R. vd. (1991), "Recent Advances in Crew -Pairing Optimization at American Airlines," *Interfaces*, 21/1 (January-February).
- ANBİL, R. vd. (1992), "A Global Approach to Crew-Pairing Optimization," *IBM Systems Journal* (Vol.31, No.1).

- ANTOINE, N. E. vd. (2004), "Fleet Assignment Using Collective Intelligence," *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 5-8 January(Reno, Nevada).
- BARNHART, C. / KNIKER, T. S. / LOHATEPANONT, M. (2002), "Itinerary-Based airline Fleet Assignment," *Transportation Science*, 36 /2.
- CLARKE, L. W. vd. (1995), "Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment," www.isye.gatech.edu/research/files/lec9407.pdf
- COPPARA, A. / TOTH, P. / FISCHETTI, M.,/ (2000), "Algorithms for the Set Covering Problem," *Annals of Operation Research*, 98.
- DESROSIERS, J. vd. (2000), "Air Transat Uses ALTITUDE to Manage Its Aircraft Routing Crew Pairing, and Work Assignment," *Interfaces*, 30/ 2 (March -April).
- EKENBÄCK, A. (2002), *Optimal crew groups;A column generation heuristic for a combinatorial optimization problem* Master's Thesis in Computer Science at the School of Engineering Physics, Royal Institute of Technology.
- ERNST, A. T. vd. (2001), "An Integrated Optimization Model for Train Crew Management," *Annals of Operations Research*, 108.
- FAHLE, vd. (2002), "Constraint Programming Based Column Generation for Crew Assignment," *Journal of Heuristics*, 8.
- FILAR, J. A. / MANYEM, P. / WHITE, K. (2001), "How Airlines and Airports Recover from Schedule Perturbations: A Survey," *Annals of Operations Research* 108: 315-333.
- GOPALAN, R. / TALLURI, K. (1998), "Mathematical Models in Airline Scheduling Planning: A Survey," *Annals of Operations Research*, 76.
- GÖTZ, S. VD. (1999), "Solving the weekly Fleet Assignment Problem for Large Airlines," *MIC'99 - III Metaheuristics International Conference*, Angra dos Reis, Brazil, July 19-22.
- GRÖNKVIST, M. (2000) "Aircraft Scheduling," www.cs.chalmers.se/~mattiasg/ac scheduling.ps.
- GU, Z. (1993), "Some Properties of the Fleet Assignment Problem," www.isye.gatech.edu/research/files/lec9206.pdf.
- HANE, C. A. vd. (1995), "The Fleet Assignment Problem: Solving a Large- Scale Integer Programming," *Mathematical Programming*, 70.
- HJORRING, C. A. / KARISH, S. E. / KOHL, N., (2000), "Carmen System's Recent Advances in Crew Pairing," www.carmen.se.
- IOACHIM, I. VD. (1998), "Theory and Methodology: Fleet Assignment and Routing with scheduling Synchronization Constraints," *European Journal of Operation Research*, 119.
- JIN, D. / POWELL, H. L. (2000), "Optimal Fleet Utilization and Replacement," *Transportation Research Part E*, 36.
- KAKAS, A. C. / MICHAEL, A (1998), "An Abductive Based Scheduler for Air-crew Assignment," taylorandfrancis.metapress.com/index/H6NWUK1WVWR7XBUU.pdf
- KILBORN, E. (2000), *Aircraft Scheduling and Operation - a Constraint Programming Approach*, Thesis for Degree of Master of Science, Department of Computing Science, Chalmers University of Technology and Göteborg University, SE-412 96 Göteborg, Sweden.
- KLABJAN, D. / SCHWAN, K. (1999), "Airline Crew Pairing Generation in Parallel," www.isye.gatech.edu/research/files/lec9902.pdf
- KLABJAN, D. (2003), "Large-scale Models in the Airline Industry," https://netfiles.uiuc.edu/klabjan/chapters_in_books/surveyAirlineOR.pdf
- KLABJAN, D. vd. (2001), "Solving Large Airline Crew Scheduling Problems: Random Pairing Generation and Strong Branching," *Computational Optimization and Applications*, 20.
- KOHL, N. (1999), "The use of linear and integer programming in airline crew scheduling," www.cs.chalmers.se/Cs/Grundutb/Kurser/tranopt/airline/niklas99.ps
- KOHL, N. / KARISH, S. (2004), "Airline Crew Rostering: Problem types, Modeling, and Optimizations," *Annals of Operations Research*, 127.

- KONTOGIORGIS, S. / ACHARYA, S. (1999), "US Airways Automates its Weekend Fleet Assignment," *Interfaces*, 29/3.
- KÖVARI, B. (2002), "Modern Crew Management Methods in Air Transport," *Periodica Polytechnica Ser. Transp. Eng.* (Vol.31, No. 1-2).
- LEEUWEN / HESSELINK / ROHLING (2002), "Scheduling Aircraft Using Constraint Satisfaction," *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 76.
- LOHATEPANONT, M. / BARNHART, C. (2004), "Airline Scheduling Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment," *Transportation Science*, 38/1.
- REXING, vd. (2000), "Airline Fleet Assignment with Time Windows," *Transportation Science*, 34/1.
- RICHTER, H. (1989), "Thirty Years of Airline Operations Research," *Interfaces*, 19/4 (July - August).
- ROSENBERG, J. M. vd. (2000), "SimAir: A Stochastic Model of Airline Operations," *Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference*.
- RUSHMEIER, R. A. / KONTOGIORGIS, S. A. (1997), Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment, *Transportation Science* (vol. 31, No. 2).
- SAKKOUT, H. E. (1996), "Modelling Fleet Assignment in a Flexible Environment," in *Proc. of the Second International Conference on the Practical Application of Constraint Technology (PACT 96)*, <http://www.icparc.doc.ic.ac.uk/~hhe/>
- YAN, S. / TSENG, C. H. (2002), "A Passenger Demand Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing," *Computer & Operations Research* 29.
- YU, G. (Ed.) (1998), *Operation Researchs in the Airline Industry* (Austin, USA).
- WEI, G. / YU, G. / SONG, M. (1997), "Optimization Model and Algorithm for Crew Management During Airline Irregular Operations," *Journal of Combinatorial Optimization* 1.