

İstanbul Havalimanı Çoklu Paralel Pist Operasyonları İçin Pist Atama Optimizasyon Modeli (PMM) Analizi

İncelenen Çalışma: Güven, A., Aybek Çetek, F. ve Çeçen, R.K. (2024)
The Aeronautical Journal

23 Aralık 2025

Özet

Bu rapor, İstanbul Havalimanı'ndaki taksi operasyonlarından kaynaklanan yakıt tüketimini minimize etmek amacıyla geliştirilen Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama (MILP) modelinin teknik detaylarını ve matematiksel formülasyonunu sunmaktadır. Model, gerçek trafik verilerini, uçak performans kategorilerini ve pist konfigürasyonlarını dikkate alarak optimum pist atamasını gerçekleştirmeyi hedefler.

İçindekiler

1	Giriş ve Modelin Kapsamı	2
2	Model Bileşenleri	2
2.1	Kümeler (Sets) ve İndisler	2
2.2	Parametreler	2
2.3	Karar Değişkenleri	3
3	Matematiksel Formülasyon	3
3.1	Amaç Fonksiyonu	3
3.2	Kısıtlar ve Açıklamaları	3
4	Sonuç ve Değerlendirme	5

1 Giriş ve Modelin Kapsamı

Bu çalışma, İstanbul Havalimanı'nın yoğun trafik akışında, çoklu paralel pist operasyonlarını (özellikle Kuzey konfigürasyonu) dikkate alarak yer hareketlerini optimize etmeyi amaçlayan bir model sunmaktadır. Model, uçakların kapı (gate) atamalarını sabit kabul ederken, pist atamalarını optimize ederek toplam taksi süresini ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltmayı hedefler.

2 Model Bileşenleri

2.1 Kümeler (Sets) ve İndisler

Modelin temel yapı taşları aşağıdaki gibidir:

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$: Operasyondaki tüm uçakların kümesi.
- $J = \{1, 2, \dots, r\}$: Kullanılabilir pistler kümesi.
- $K = \{1, 2, \dots, s\}$: Park pozisyonları kümesi.

İndisler: $i, i_1, i_2 \in I$ (uçak), $j, j_1, j_2 \in J$ (pist), $k \in K$ (park pozisyonu).

2.2 Parametreler

Modelde kullanılan sabit veriler ve katsayılar (Çok harfli parametreler italik metin olarak düzenlenmiştir):

- ox_i : Operasyon tipi (1: İniş, 2: Kalkış).
- $ra_{ox_i, j}$: Pist uygunluk matrisi. ox_i tipindeki uçak j pistini kullanabiliyorsa 1, aksi halde 0.
- dpr_{j, j_2} : Pist bağımlılık parametresi. j ve j_2 pistleri aynı veya paralel bağımlıysa 1, aksi halde 0.
- $taxiin_{j, k}$: İniş yapan uçağın j pistinden k parkına taksi süresi.
- $taxiout_{j, k}$: Kalkış yapan uçağın k parkından j pistine taksi süresi.
- M : Büyük sayı (Big-M). Formülü: $M = (rt_{i_2} - rt_{i_1}) \cdot 2$.
- rt_i : Gerçek veriden alınan pist kullanım zamanı (Referans zaman).
- t_i : Gerçek verideki taksi süresi.
- g_i : Gerçek verideki park pozisyonu.
- f_i : Uçak i için taksi sırasındaki yakıt akış oranı.
- p_i : Uçak performans kategorisi (Heavy, Medium, Light).

- $tsep_{j,p_{i_1},p_{i_2},ox_{i_1},ox_{i_2}}$: Uçak performans kategorileri (p_i) ve operasyon tiplerine göre kuyruk türbülansı (Wake Turbulence) ayırım süresi.
- B : Aynı park yerini kullanan uçaklar arasındaki minimum zaman ayırımı.

2.3 Karar Değişkenleri

Optimizasyon sonucunda belirlenecek değişkenler:

- **İkili (Binary) Değişkenler:**
 - $x_{i,j}$: Uçak i , j pistine atanırsa 1, aksi halde 0.
 - e_{1i_1,i_2} : Pist kullanımında i_1 uçağı i_2 'den önce geliyorsa 1, aksi halde 0.
 - e_{2i_1,i_2} : Park pozisyonu kullanımında i_1 uçağı i_2 'den önce geliyorsa 1, aksi halde 0.
- **Sürekli Değişkenler:**
 - rut_i : Uçağın pisti kullandığı an (İniş/Kalkış zamanı).
 - gut_i : Uçağın park pozisyonuna vardığı veya ayrıldığı an.
 - aw_i : İniş sonrası park yerine girmeden önceki bekleme süresi.
 - gw_i : Kalkış öncesi pist başı kuyruk bekleme süresi.
 - $taxia_i$ / $taxid_i$: Atanan piste göre hesaplanan taksi süreleri.

3 Matematiksel Formülasyon

3.1 Amaç Fonksiyonu

Modelin temel amacı, tüm uçakların taksi ve bekleme süreleri boyunca tükettiği toplam yakıtı minimize etmektir.

$$\min \sum_i (taxia_i + taxid_i + aw_i + gw_i) \cdot f_i \quad (12)$$

3.2 Kısıtlar ve Açıklamaları

1. Pist Atama Kısıtları

Her uçak, operasyon tipine uygun olan tek bir piste atanmalıdır.

$$\sum_{j|ra_{ox_i,j}=1} x_{i,j} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1a)$$

Not: Makalede yer alan Eşitlik (1b), optimizasyon için değil, mevcut durumun (FRAA) doğrulanması için kullanılır.

2. Zamanlama Kısıtları

İniş Zamanı: İniş yapan uçakların ($ox_i = 1$) pist kullanım zamanı (rut_i), gerçek verideki zamana (rt_i) eşitlenmiştir.

$$rut_i = rt_i \quad \forall i \in I, ox_i = 1 \quad (2)$$

Kalkış Kapıdan Ayrılış Zamanı: Kalkış yapan uçaklar için parktan ayrılış zamanı referans olarak hesaplanır.

$$gut_i = rt_i - t_i \quad \forall i \in I, ox_i = 2 \quad (3)$$

Kalkış Pisti Kullanım Zamanı: Uçağın kalkış yapacağı zaman; kapıdan ayrılış, yeni atanan pistin taksi süresi ve kuyruk bekleme süresinin toplamıdır.

$$rut_i = rt_i - t_i + \sum_j x_{i,j} \cdot taxiout_{j,k} + gw_i \quad \forall i \in I, \forall k \in K, ox_i = 2, k = g_i \quad (4)$$

İniş Parka Varış Zamanı: İniş yapan uçağın park pozisyonuna varışı.

$$gut_i = rut_i + \sum_j x_{i,j} \cdot taxiin_{j,k} + aw_i \quad \forall i \in I, \forall k \in K, ox_i = 1, k = g_i \quad (5)$$

3. Ayrım (Separation) Kısıtları

Pist Ayrımı (Wake Turbulence): Aynı veya bağımlı ($dpr = 1$) pistleri kullanan ardışık iki uçak arasında minimum ayrım süresi sağlanmalıdır.

$$rut_{i_2} - rut_{i_1} \geq tsep_{j,p_{i_1},p_{i_2},ox_{i_1},ox_{i_2}} - (1 - e_{1i_1,i_2}) \cdot M - (2 - x_{i_1,j_1} - x_{i_2,j_2}) \cdot M \quad (6)$$

$$rut_{i_1} - rut_{i_2} \geq tsep_{j,p_{i_2},p_{i_1},ox_{i_2},ox_{i_1}} - e_{1i_1,i_2} \cdot M - (2 - x_{i_1,j_1} - x_{i_2,j_2}) \cdot M \quad (7)$$

Koşul: $\forall i_1, i_2 \in I, \forall j_1, j_2 \in J, i_1 \neq i_2, dpr_{j_1,j_2} = 1$.

Park Pozisyonu Ayrımı: Aynı park yerini kullanan uçaklar arasında çakışmayı önlemek için B parametresi kadar süre bırakılır.

$$gut_{i_2} - gut_{i_1} \geq B - (1 - e_{2i_1,i_2}) \cdot M \quad (8)$$

$$gut_{i_1} - gut_{i_2} \geq B - (e_{2i_1,i_2}) \cdot M \quad (9)$$

Koşul: $\forall i_1, i_2 \in I, g_{i_1} = g_{i_2}$.

4. Taksi Süresi Hesaplamaları

Amaç fonksiyonunda kullanılan taksi süreleri:

$$taxia_i = \sum_j x_{i,j} \cdot taxiin_{j,k} \quad (\forall i \in I, \forall k \in K, ox_i = 1, k = g_i) \quad (10)$$

$$taxid_i = \sum_j x_{i,j} \cdot taxiout_{j,k} \quad (\forall i \in I, \forall k \in K, ox_i = 2, k = g_i) \quad (11)$$

4 Sonuç ve Değerlendirme

PMM (Proposed Mathematical Model), İstanbul Havalimanı verileri kullanılarak oluşturulan senaryolarda taksi sürelerini minimize ederek yakıt tüketimini düşürmektedir. Model, özellikle kalkış trafiğinde gw_i (kuyruk bekleme) değişkenini optimize ederek verimlilik sağlamaktadır. Ancak Denklem (2)'de iniş zamanlarının sabitlenmesi ($rut_i = rt_i$), modelin çözüm uzayını sınırlayan önemli bir faktördür ve operasyonel esnekliği bir miktar kısıtlamaktadır.