

# A repülőtéri állóhelyek kiosztásának optimalizálása többcélú lineáris programozással / Optimizing airport stand allocation using multi objective linear programming

Hegy Patrik<sup>1</sup> – Dr. Csonka Bálint<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

<sup>1</sup>hegyip@edu.bme.hu

<sup>2</sup>csonka.balint@kjk.bme.hu

**Kivonat:** A repülőtéri állóhelyek kiosztása többcélú optimalizálási folyamat, amely hatással van az üzemeltetés hatékonyságára, és gyors beavatkozást igényel változó körülmények esetén (pl. késések kezelése kedvezőtlen időjárási körülmények esetén), különösen a forgalmas repülőtereken. Cikkünkben modellezzük és optimalizáljuk a repülőtéri állóhelyek kiosztását, ami a cikk tudományos értéke. Bemutatjuk a repülőtéri állóhelyek kiosztásának folyamatát és problémáját, különös tekintettel a kiosztást befolyásoló tényezőkre. Kidolgozzuk az állóhelyek kiosztásának lineáris programozási modelljét, meghatározzuk a korlátokat és a célfüggvényeket, figyelembe véve többek között az állóhely használati költségeket és az utasok gyaloglási idejét. Egy fiktív repülőtéren modelleztük a különböző állóhely-típusokat, és optimalizáltuk az állóhelyek kiosztását. A többcélú optimalizálás célfüggvényeinek súlyát változtatva négy esetet vizsgáltunk. A súlyozás eredményeként az állóhelyek elosztása többféleképpen is optimalizálhatóvá vált.

**Abstract:** Airport stand allocation is a multi-purpose optimization process that has an impact on operational efficiency and requires rapid intervention in case of changing conditions (e.g., managing delays in case of severe weather conditions), especially at busy airports. In our article, we model and optimize airport stand allocation, which is the scientific value. We present the process and the problem of airport stand allocation, with a special focus on factors influencing the allocation. We develop a linear programming model of stand allocation, define constraints and objective functions considering parking (stand usage) cost and passenger walking time among others. A fictitious airport was modelled, and the stand allocation was optimized. Four weighting cases were examined. As a result of weighting, the allocation of stands can be optimized in several ways.

*Kulcsszavak: állóhely kiosztás; lineáris programozás; modellezés; optimalizálás; repülőtér-üzemeltetés*

*Keywords: airport operation, linear programming, optimization, modelling, stand allocation*

## Bevezetés

Az állóhelyek kiosztása a légitforgalmi menedzsment feladata, mely során a járatokat a menetrend és a földi kiszolgálási igények alapján rendelik hozzá állóhelyhez és utasforgalmi kapuhoz.

A repülőtéri állóhelyek kiosztása jelentős kihívást jelent a repülőtér-üzemeltetők számára, mivel jelentős hatással van a földi kiszolgálás hatékonyságára, az utasok kényelmére és a légitársaságok elégedettségére, általánosabban a repülőterek infrastruktúrájához és erőforrásaihoz való hatékony hozzáférésre. Ezen túlmenően a változó körülmények (pl. késések) esetén gyors beavatkozást igényel, különösen a zsúfolt repülőtereken. A kapacitást úgy kell elosztani, hogy a repülőtér magas színvonalon ki tudja elégíteni a keresletet, és minimálisra csökkentse a zavarok és a kereslet csúcsok negatív hatásait. A napi járatok nagy száma és a kiosztás összetettsége (pl. a repülőgépek mérete és a légitársaságok preferenciái) miatt a kézi kiosztás nem hatékony. Ezért felmerül az igény az állóhely kiosztó eljárásokra.

Az optimalizálási módszereket széles körben használják kapacitáskorlátos környezetben ([1], [2]). Ebben a cikkben egy egészértékű lineáris programozási modellt és optimalizáló módszert dolgozunk ki a repülőtéri állóhelyek kiosztására, ami a cikk tudományos értéke. Azonosítjuk a repülőterek infrastruktúrájához való hozzáférést, a költségeket és a szolgáltatás minőségét befolyásoló főbb tényezőket. Többek között figyelembe vesszük a zavarokkal szembeni ellenálló képességet kiegészítő

pufferidők meghatározásával, az utasok gyaloglási távolságát, és a légitársaságok preferenciáit, ami a fő újdonságot jelenti.

A cikk felépítése a következő: az 1. fejezetben a vonatkozó szakirodalom átfogó áttekintése található. A 2. fejezetben a fizikai modell kerül bemutatásra. Az optimalizálás matematikai hátterét a 3. fejezet tartalmazza. A 4. fejezetben a kifejlesztett módszert egy fiktív repülőtéren alkalmazzuk. Végül a következtetések levonására kerül sor.

## 1. Szakirodalmi áttekintés

Az elmúlt két évtizedben a légiközlekedési ágazatban jelentősen megnőtt a kereslet, ami a nagy repülőterek fejletlen infrastruktúrája miatt korlátozott kínálattal párosult. Ez világszerte torlódásokhoz és késésekhez vezetett a nagy forgalmú repülőtereken. A repülőtéri kapacitásgazdálkodás témája ezért jelentős tudományos figyelmet kapott [3]. A hatékony repülőtéri üzemeltetés meghatározása fontos és kritikus probléma a repülőterek, a légitársaságok, az utasok és más érdekelt felek számára. Sőt, a következő években várható forgalomnövekedés miatt valószínűleg még inkább azzá válik [4].

A repülőtereken felmerülő egyéb elosztási problémák közé tartozhat az utasbiztonsági ellenőrzés során alkalmazott átvilágító kapuk optimális számának meghatározása [5]; az utasfelvételi (check-in) pultok elosztása [6], [7], a hátratólási idő tervezése [8], a gurulási mód kiválasztása [9], valamint a résidőkiosztás [10].

A növekvő légi forgalom, az emelkedő üzemanyagköltségek és a szigorúbb környezetvédelmi célok miatt a földi mozgások hatékony működtetése az idő és az üzemanyag-fogyasztás szempontjából egyre sürgetőbb kérdéssé válik. A probléma lehetséges megoldásait több tudományos cikk is tárgyalja. A gurulási idő pontos meghatározása és a megfelelő indulás előtti irányítási stratégiák kiemelkedő fontosságúak az együttműködő repülőtéri döntéshozatal (ACDM) keretében [11]. Például a guruló repülőgépek indulási ütemtervének és sebességprofiljának egyidejű meghatározása, többcélú optimalizálási problémaként fogalmazható meg [12].

Mivel a repülőtéri állóhely-kiosztási probléma az általános hozzárendelési probléma speciális esete (a sor- és oszlopösszegnek nem kell 1-et adnia), ezért a komplexitása is hasonló. Emiatt a probléma matematikai modellezése általában a hozzárendelési probléma modellezési technikáin alapul [13]. A leggyakrabban használt modellek a következők [14]: lineáris programozás, kvadratikus programozás, dinamikus programozás, vegyes egészértékű lineáris és nemlineáris programozás, sztochasztikus programozás, robusztus optimalizálás, heurisztikus optimalizálás [15] és modell prediktív szabályozás.

A módszerek egyesíthetik a Bayes-modellezés és a metaheurisztika előnyeit, hogy robusztusabb megoldásokat hozzanak létre a repülőtéri járatkimaradásokra [16]. Például Bagamanova és Mota által javasolt módszer jól működik vészhelyzetekben és fennakadások, zavarok esetén [16].

Amennyiben az egyes repülőtéren található szervezetek, valamint utasok számára fontos szempontokat is figyelembe kell venni, akkor a multikritériumos állóhelykiosztási modellek nyújthatnak segítséget. A preferenciák jellemzésére fuzzy logika [17] vagy sztochasztikus megközelítések [16] alkalmazhatók. Ezen módszerek érzékenyek a különböző repülőtér-használók szempontjainak figyelembevételére.

A modellek összehasonlítása [18] segít a megfelelő modell kiválasztásában, azok előnyei és hátrányai alapján. A vegyes egészértékű programozáson (MIP) alapuló megközelítések lényegesen jobb megoldásokat adnak, mint például a mohó algoritmus. A MIP modellek megoldásának számítási időszükséglete alacsony néhány ezer változó esetén is. A térbeli dekompozíciós heurisztika a legtöbb esetben optimális, az időbeli dekompozíciós heurisztika pedig nagyon jó megoldásokat ad.

A modellezés fontos eleme a célfüggvények meghatározása és a kívánt célok elérése. Az állóhely-kiosztás esetében a leggyakoribb célok a következők:

- gyaloglási idő minimalizálása: [15], [19], [20]
- autóbuzsos beszállítás számának minimalizálása: [18]
- vontatási, illetve hátratólási műveletek számának minimalizálása: [20]
- költségek minimalizálása: [15]
- terminál közeli állóhelyekre kiosztott járatok számának maximalizálása: [18], [20]

- a bevételek maximalizálása: [20].

Általában ezeket a célokat többcélú optimalizálási problémává alakítják át. Egy közepes ( $\approx 10$  millió utas évente) kínai repülőtér többszemponútú optimalizálása után az utasok által megtett teljes távolság 4512 lépéssel csökken, miközben egy állóhely megtakarítható, és a többi állóhely használatának hatékonysága 31%-kal nő [15].

Az állóhely-kiosztási terv elkészítése összetett, többszereplős művelet, ugyanakkor nincs rá olyan iránymutatás, mint a résidő-kiosztásra [21]. A különböző üzemeltetők másképp is végezhetik, például az amszterdami Schiphol repülőtéren a végleges tervet három, különböző információkon alapuló terv kidolgozása előzi meg [22]. Ezen a repülőtéren a járatok állóhelyekre történő kiosztása egy kvadratikus, több szemponútú programozási probléma. A probléma nem korlátozódhat a járatokra és a kapukra, hanem a repülőgépek elhelyezését a repülőtér egyéb helyein is magában kell foglalnia [23].

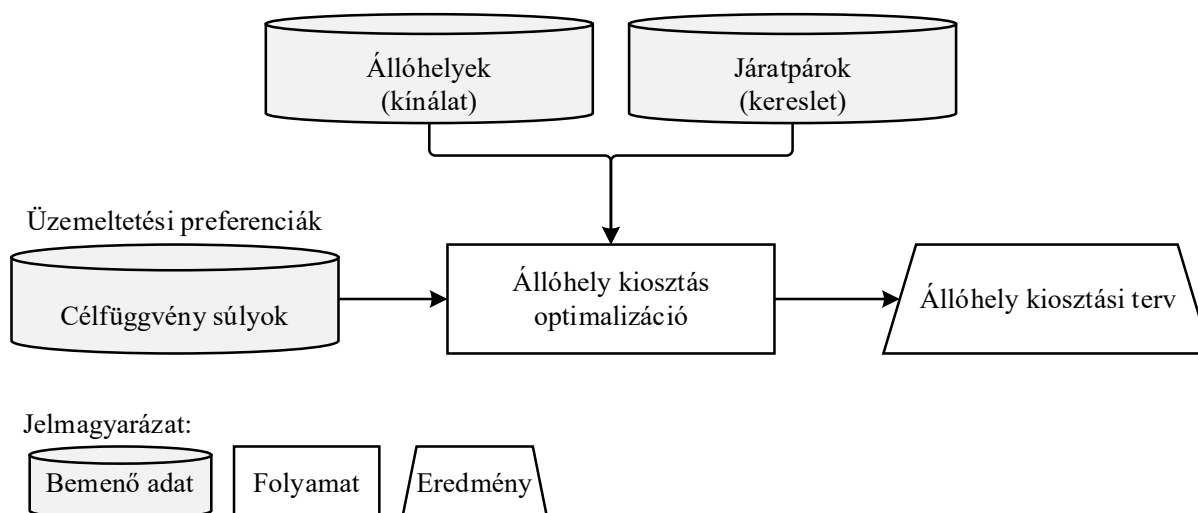
Ilyen egyéb hely lehet például a repülőgépeket karbantartó vállalat hangárja. Qin és szerzőtársai által javasolt probléma célja a karbantartási megbízások olyan részalmazának azonosítása, amely maximális nyereséget és megvalósítható parkolási ütemtervet biztosít egy csúcsonapon [24]. A feltételezés szerint a repülőgépek között nem lehet átfedés, és az ütközés kockázatát az egyes repülőgéppárok közötti legrövidebb távolság alapján minimalizálni kell. A repülőgép-párok közötti átfedés megakadályozására No-Fit Polygon (NFP) mechanizmust használtak. Kétlépcsős MIP-megközelítést alkalmaztak, amelyben az első modell a karbantartási megbízások azon részalmazának megtalálására szolgált, amely a legnagyobb teljes biztonsági tartalékkal rendelkezik, míg a második modell a felülvizsgált NFP-k alapján maximalizálja a teljes biztonsági tartalékot.

Az állóhelyek beszállító kapukon keresztül érhetőek el, ezért ezeket az állóhelyek mellett járatokhoz is kell rendelni. A járatok kapukhoz való hozzárendelésének feladatát kapu hozzárendelési problémának (GAP) nevezik. Alapvető formájában a GAP olyan minimális költségű hozzárendelést talál, hogy egyszerre csak egy repülőgép foglalhasson el egy kaput. A modellek lehetnek egy- [25] vagy többcélúak [26], [27]. Különböző matematikai módszerek is alkalmazhatók, például többkritériumos elemzés [28], statikus megoldás [29], sztochasztikus [30] vagy akár metaheurisztikus megközelítés [31].

A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítottuk, hogy a korábbi tanulmányok leggyakrabban viszonylag kevés célfüggvényt határoztak meg. Kutatási hiányosságként azonosítottuk az átfogó, minden egyes érdekelt fél szempontjait figyelembe vevő többcélú függvény alkalmazását.

## 2. Fizikai modell

Az állóhely-kiosztás folyamatát az 1. ábrán foglaltuk össze.



1. ábra: Az állóhely kiosztás fizikai modellje

Járatpárokat alakítottunk ki, azaz azokat az érkező és induló járatokat párosítottuk, amelyeket ugyanaz a repülőgép szolgál ki. A járatpárokat állóhelyekhez rendeljük, ahol a repülőgép az érkezés és az indulás

között parkol. A kiosztást a keresletre, a kínálatra és a működésre vonatkozó adatok, nevezetesen a járatpárok, az állóhelyek és az optimalizálási célok súlyai alapján végezzük.

A járatpárokat a következő adatokkal jellemeztük: az érkezési és indulási idő, az érkezési és indulási pufferidő, a kiindulási és a célország a határellenőrzés típusára vonatkozóan, a repülőgép mérete és a légitársaságok preferenciái az állóhelyek tekintetében. A pufferidőket a repülőtér üzemeltetője határozza meg, hogy növelje az állóhely kiosztási terv ellenállóképességét a változó körülményekkel szemben.

Az állóhelyek adatai közé tartozik a méret, a parkolási költség, az állóhely zónája, a be- és kiszállás módja, az utasok gyaloglási ideje, a gurulási idő és az állóhely elhagyásának módja. A gyaloglási idő a terminál főbejárata és az állóhelyhez rendelt beszállító kapu közötti átlagos gyaloglási idő. A modellben minden autóbusszal kiszolgált terminál-távoli állóhelyhez a terminálon belül egy külön, közös kaput rendelünk.

Léteznek olyan állóhelyek, amelyek átfedik egymást. Ezen állóhelyek egyszerre két kisebb repülőgép vagy egy nagy repülőgép elhelyezését teszik lehetővé. A modellben ezt az átfedést 3 állóhellyel modellezzük: 2 kis és 1 nagy állóhellyel.

A követelmények a kiosztásra vonatkozó kemény korlátozások, mint például a menetrend, az állóhely, valamint a repülőgép mérete. A preferenciák puha korlátozások, ilyen például az, hogy a fapados légitársaságok előnyben részesítik az olcsóbb állóhelyeket.

### 3. Matematikai modell

#### 3.1 Lineáris programozási modell

Ha a lineáris programozási modellt  $x$ -re kell megoldani, akkor a célfüggvényt az (1), a korlátozásokat a (2) egyenlet írja le.

$$f(x) = cx^T \quad (1)$$

$$Ax \leq b \text{ és } x \geq 0 \quad (2)$$

##### 3.1.1 Paraméterek

A járatpárokat a következő attribútumokkal írtuk le:

- $f_{ID}$ : járatpár azonosító  $\{1 \dots m\}$
- $t_A$ : érkezési idő
- $t_D$ : indulási idő
- $t_{BA}$ : pufferidő érkezéskor
- $t_{BD}$ : pufferidő induláskor
- $f_c$ : légi jármű méretkategória

A járatpárok száma  $m$ . A légi járművek méretkategóriáit 0-nál nagyobb szám jelzi. A nagyobb szám nagyobb méretkategóriát jelent.

Az állóhelyeket a következő attribútumokkal jellemeztük:

- $s_{ID}$ : állóhely azonosító  $\{1 \dots n\}$
- $s_C$ : állóhelyen kiszolgálható legnagyobb légi jármű kategóriája
- $s_Z$ : határellenőrzési zóna
- $s_{BD}$ : be- és kiszállás módja
- $s_{WL}$ : állóhely elhagyásának módja
- $c_s$ : állóhelyen (parkolási) költség
- $c_h$ : kiszolgálás költsége
- $c_l$ : elhagyás költsége
- $t_{wt}$ : gyaloglási idő (a terminál bejárata és az állóhelyhez tartozó beszállítókapu között)
- $t_{st}$ : gurulási idő
- $c_{sl}$ : állóhely elhelyezkedésének költsége (terminálhoz közeli vagy távoli)

Az állóhelyek száma  $n$ . Az egyetlen járatpár- és állóhelyfüggő bemenő adat az állóhelyek légitársasági preferenciája ( $c_{pr}$ ). A magas preferenciájú állóhelyhez rendelt járatpárok magasabb légitársasági elégedettséget jelentenek.

### 3.1.2 Változók

Az állóhelyek foglaltsága ( $x_i$ ) egy bináris változó. Az  $x_i$  változó 0, ha a  $f_{ID}$  járatpár nem lett kiosztva az  $s_{ID}$  állóhelyre, egyébként 1. Az  $i$ ,  $n$ ,  $f_{ID}$  és  $s_{ID}$  indexek közötti kapcsolatot a (3) mutatja.

$$i = n(f_{ID} - 1) + s_{ID} \quad (3)$$

A járatpárok és az állóhelyek közötti kapcsolatot az 1. táblázatban szemléltetjük.

1. táblázat: A járatpárok, az állóhelyek és a változók közötti kapcsolat

Járatpárok		Állóhelyek				
$f_{ID}$	úticél	1	2	3	4	5
1	New York	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
2	Frankfurt	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
3	London	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
4	Párizs	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$

Az azonos sorban lévő változók ugyanahhoz a járatpárhoz, az azonos oszlopban lévő változók pedig ugyanahhoz az állóhelyhez tartoznak. A példában 5 állóhely és 4 járatpár található. Ennek megfelelően 20 ( $i: 1 \dots 20$ ) bináris változó van.

### 3.1.3 Korlátozások

A modell létrehozása során 5 korlátozó feltételt azonosítottunk. Ezek az alábbiak:

1. Egy járat csak egy állóhelyre lehet beosztva és minden járatához kell tartozzon állóhely (4).
2. A légitársaságokat csak megfelelő méretű állóhelyhez lehet hozzárendelni (5).
3. Az egymást átfedő állóhelyeknél kerülni kell a blokkolást (6).
4. Egy időben egy állóhelyen egy repülőgép lehet, illetve a vizsgált időtartamon belül egymás után több járat is beosztható kell, hogy legyen (7).

$$\sum_{s_{ID}} x_{n(f_{ID}-1)+s_{ID}} = 1 \quad \forall f \in \{1 \dots m\} \quad (4)$$

$$x_i \cdot f_c \leq s_c \quad (5)$$

$$x_\alpha + x_\beta \leq 1 \text{ ahol } x_\alpha \text{ és } x_\beta \text{ blokkolja egymás} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_f x_{n(f-1)+s} \leq 1, \text{ az adott járatpárok egyszerre vannak a repülőtéren} \\ \sum_f x_{n(f-1)+s} \geq 0, \text{ az adott járatpárok nincsenek egyszerre a repülőtéren} \end{cases} \quad (7)$$

## 3.2 Célfüggvények

Hat célfüggvényt határoztunk meg, figyelembevéve a repülőtér, a légitársaságok és az utasok szempontjait.

Minimalizáljuk az állóhely költségeket (8), az üzemeltetési költségeket (9), a gyaloglási időt (10) és a gurulási időt (11).

$$\min f_1(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} c_{s,i} \cdot x_i \quad (8)$$

$$\min f_2(x_i) = \sum_{i=1}^n c_{o,i} \cdot x_i = \sum_{i=1}^{nm} (c_{h,i} + c_{l,i}) \cdot x_i \quad (9)$$

$$\min f_3(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} t_{wt,i} \cdot x_i \tag{10}$$

$$\min f_4(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} t_{st,i} \cdot x_i \tag{11}$$

Maximalizáljuk a preferált állóhelyekhez rendelt járatok számát (12) és a terminálhoz közel lévő állóhelyekre kiosztott járatok számát (13).

$$\max f_5(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} c_{pr,i} \cdot x_i \tag{12}$$

$$\max f_6(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} c_{sl,i} \cdot x_i \tag{13}$$

### 3.3 Többcélú optimalizálás

Az optimális megoldást minden cél szerint külön-külön meghatároztuk, majd a célokhoz súlyokat rendeltünk ( $w_1 \dots w_6$ ). Ezután a súlyozott célfüggvényeket azonos skálára transzformáltuk, és a következők szerint összegeztük. (14).

$$\min: w_1 \left( \frac{Z'_1 - Z_1}{Z_1} \right) + w_2 \left( \frac{Z'_2 - Z_2}{Z_2} \right) + \dots + w_6 \left( \frac{Z'_6 - Z_6}{Z_6} \right) \tag{14}$$

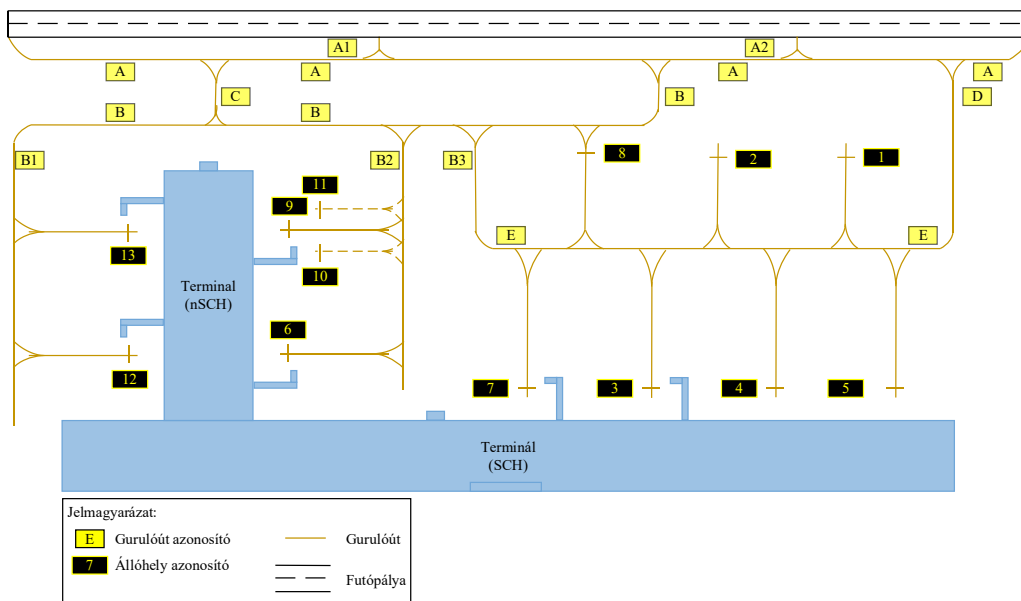
ahol:  $Z'_i$  a többcélú optimalizálás során kapott célfüggvény értéke,  $Z_i$  az egycélú optimalizálás esetén meghatározott célfüggvény értéke, és  $w_i$ : az alkalmazott súly.

## 4. Esettanulmány

Az állóhely-kiosztás optimalizálását egy fiktív repülőtérre alkalmaztuk. Több repülőtér elemzése után egy olyan repülőtérre határoztunk meg, amely integrálja a repülőterek jellemzőit, és lehetővé teszi minden egyes jellemző és korlátozó tényező figyelembevételét.

### 4.1 A minta repülőtér

A modellezett repülőtér elrendezését a 2. ábrán szemléltetjük.



2. ábra: Modellezett repülőtér (nem mérettartó)

A repülőtér tizenhárom állóhellyel rendelkezik (2. táblázat). A táblázatban szereplő rövidítések jelentései a következők:

- C, D: ICAO légitársaság-kategóriák
- PB: hátrátolás szükséges
- PO: önjáró (nem szükséges hátrátolás)
- B: autóbuzsos beszállítás
- AB: utashidas beszállítás
- W: gyalogos beszállítás
- SCH: schengeni zóna
- nSCH: nem schengeni zóna
- - : mindkét zóna

2. táblázat: A modellezett repülőtér állóhelyei

$S_{ID}$	$S_C$	$S_Z$	$S_{BD}$	$S_{WL}$
1	C	-	B	PB
2	C	-	B	PB
3	C	SCH	AB	PB
4	C	SCH	W	PB
5	C	SCH	W	PB
6	D	nSCH	AB	PB
7	C	SCH	AB	PB
8	C	-	B	PO
9	D	nSCH	AB	PB
10	C	nSCH	W/B	PB
11	C	nSCH	W/B	PB
12	C	nSCH	AB	PB
13	C	nSCH	AB	PB

Az állóhelyek közül tíz (3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 és 13) a terminálhoz közel, három (1, 2 és 8) pedig távol helyezkedik el. A terminálhoz közeli állóhelyek közül hat (3, 6, 7, 9, 12 és 13) utashíddal rendelkezik, a maradék négyből kettőnél gyalogos beszállítás szükséges (4 és 5), a másik kettő (10 és 11) pedig busszal és gyalogosan is megközelíthető. A 9-es, 10-es és 11-es állóhelyek kettős felhasználású (MARS) állóhelyek, a 9-es a fő állóhely, amelyre csak széles törzsű repülőgépek, a másik kettőre pedig csak keskeny törzsűek kerülhetnek. A 9-es állóhely blokkolja a 10-es és 11-es állóhelyet, így, ha a 9-es állóhelyről járatot indítanak, a másik kettőhöz nem lehet repülőgépet rendelni. A 8-as állóhely önjáró. A többi állóhelynél az elhagyásához segítségre van szükség. A zónák tekintetében négy állóhely csak a schengeni forgalmat, hat pedig csak a nem schengeni forgalmat tudja kiszolgálni. A másik három mindkettőre alkalmas. A 12. állóhelyen csak Airbus A220 (BCS3) típusú repülőgép fogadható, mivel az itt található csak ezt a típust tudja kezelni.

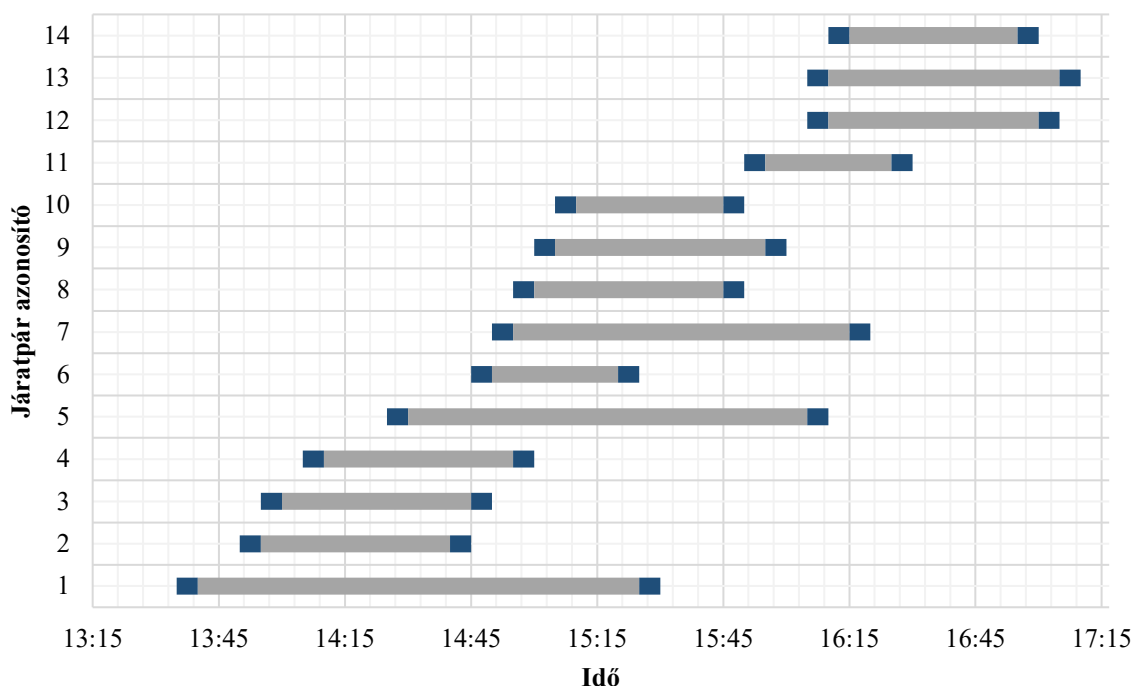
Példaként a 3. táblázatban négy, különböző jellemzővel rendelkező állóhelyek (1, 3, 9 és 13) költségeit mutatjuk be.

3. táblázat: Az 1; 3; 9; 13 állóhelyek költségei

$S_{ID}$	$c_s$	$c_h + c_l$	$t_{wt}$	$t_{st}$	$c_{sl}$
1	25	80	67	50	0
3	100	130	200	80	10
9	100	130	333	40	10
13	100	130	400	40	10

#### 4.2 Menetrend

A 3. ábra a pufferidővel rendelkező járatpárok érkezési és indulási idejét mutatja. A járatpárok azonosítója az érkezési sorrend alapján került meghatározásra.



3. ábra: A járatpárok érkezési és indulási időpontjai

A modellezett időszak menetrendjét úgy határoztuk meg, hogy ezek minél változatosabb képet adjanak (többféle üzemeltetési modell, preferencia, flotta összetétel jelenik meg), illetve minél jobban reprezentálják az előforduló forgalmat. Összesen 14 járatpárt hoztunk létre.

### 4.3 Megvalósítás

A lineáris programozási modell megoldásához az Andrew J. Mason és Iain Dunning által kifejlesztett OpenSolver [32] Excel-bővítményt használtuk.

Az egycélú optimalizálás célértékei a 4. táblázatban láthatóak.

4. táblázat: Optimális célfüggvény értéket (célértékek)

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
425	870	1670	680	540	110

Ezután elvégeztük a többcélú optimalizálást az összes költség-célfüggvénypár egyidejű figyelembevételével.

Összesen 4 súlyozási esetet elemeztünk:

1. Egyenlő súly (súly nélkül)
2. Az állóhely és az üzemeltetési költségek súlyozása
3. A légitársasági preferenciák súlyozása
4. Gyaloglási idő súlyozása

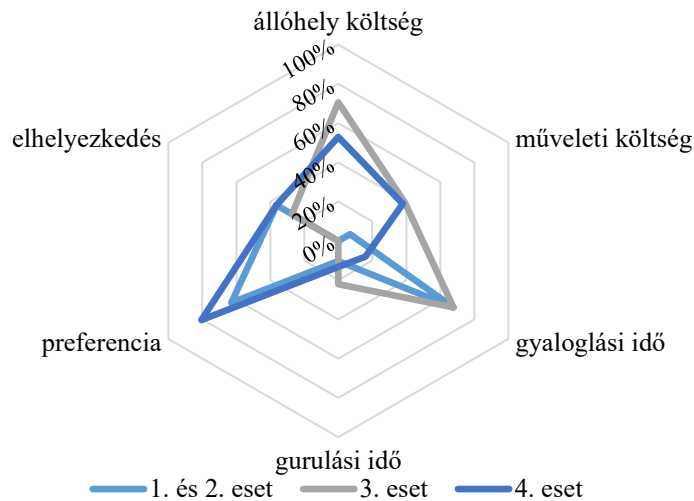
Az alkalmazott súlyokat az 5. táblázatban mutatjuk be.

5. táblázat: Alkalmazott súlyok

Költségek	Esetek			
	1	2	3	4
állóhely	0,167	0,300	0,125	0,125
üzemeltetés	0,167	0,300	0,125	0,125
gyaloglási idő	0,167	0,100	0,125	0,375
gurulási idő	0,167	0,100	0,125	0,125
preferencia	0,167	0,100	0,375	0,125
elhelyezkedés	0,167	0,100	0,125	0,125



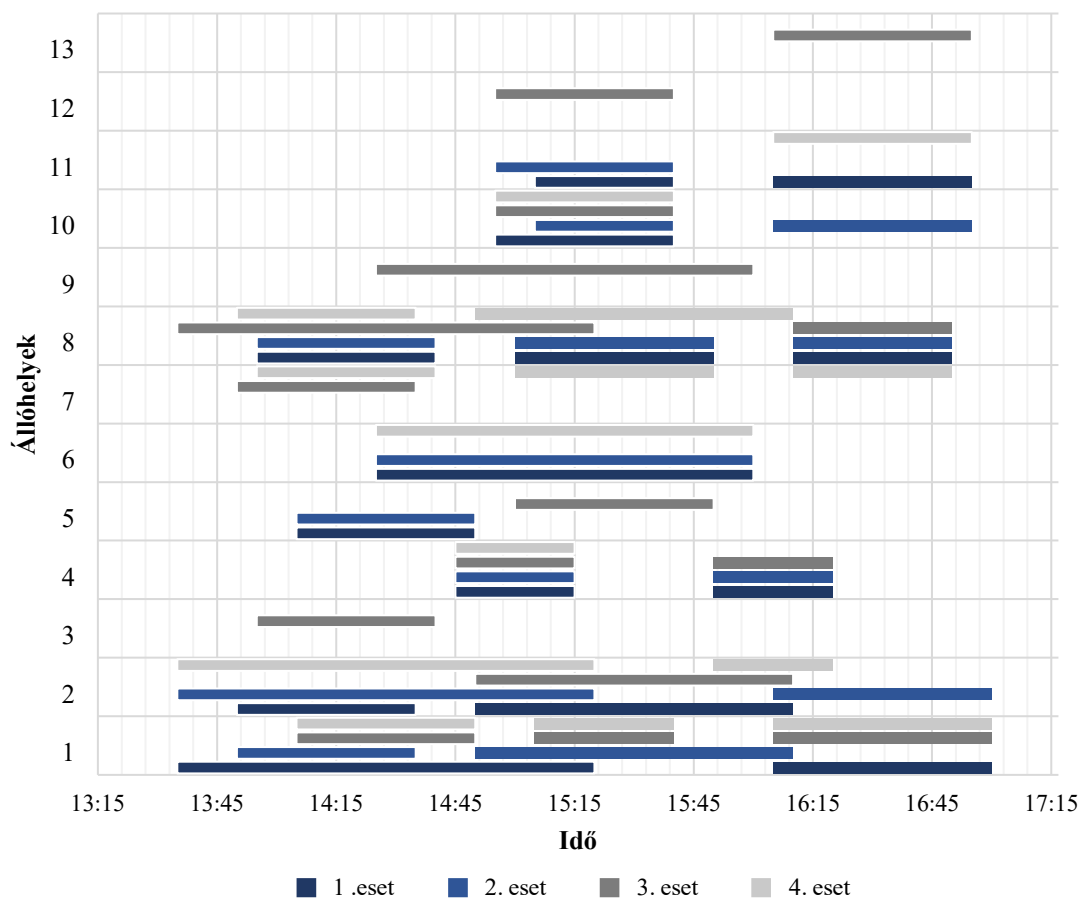
Minden egyes súlyozási esethez egy-egy hozzárendelést végeztünk el. Az optimális értékekhez ( $Z_i$ ) képesti eltéréseket a 4. ábrán illusztráljuk.



4. ábra: Az optimális értékektől való eltérések

Az első két esetben a legjelentősebb eltérések az optimális megoldástól a preferált állóhelyek és a gyaloglási idő esetében mutatkoztak, míg a harmadik esetben az állóhely költségénél és a gyaloglási időnél. Az utolsó esetben a legnagyobb eltérést a preferált állóhelyek esetében tapasztaltuk. Mivel mind a négy esetben az összes alkalmazott súly pozitív volt, a kapott megoldások egyben a többcélú optimalizálási probléma Pareto-optimális megoldásai is.

A négy esetben kapott állóhely terheléseket az 5. ábrán mutatjuk be.



5. ábra: Állóhely kiosztási terv

A leginkább terhelt állóhely a 8-as azonosítóval rendelkező, összesen 3 járat lett rá kiosztva. A foglaltsági idő tekintetében a legmagasabb átlagértéket az 1-es állóhelyen volt tapasztalható (átlagosan 2 óra 18 percig volt foglalt). Az állóhelyek kihasználtságát vizsgálva látható, hogy az első, a második és a negyedik esetben összesen 5 állóhelyre nem lett kiosztva repülőgép. Ezzel szemben a harmadik esetben csak két állóhely maradt üresen.

## Konklúzió

Összefoglalva, kidolgoztunk egy egészértékű lineáris programozási modellt a repülőtéri állóhelyek kiosztására. A kifejlesztett modell egyszerre több szempontot, köztük a légitársaságok preferenciáit is képes kezelni kézi vezérlés nélkül. Az optimalizálás segíthet az üzemeltetés hatékonyságának növelésében, a késések csökkentésében és az utasok kényelmének növelésében. További fejlesztési irányként célunk a változásokkal szembeni rugalmasságot befolyásoló tényezők figyelembevétele. Ezen felül további repülőtéri elemek bevonását és vizsgálatát is tervezzük jövőbeli kutatásaink során.

## Irodalomjegyzék

- [1] Földes D. – Csiszár Cs.: Assessment Method for Individual Value of a Location, *Transportation Research Procedia* 2017/27 814-848 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.036>
- [2] Kulcsár M. – Földes D. – Nagy S.: Determining the number of collection points for autonomous vehicle-based service using gravity model, *Smart Cities Symposium Prague, Prága 2021. május 27-28.* <https://doi.org/10.1109/SCSP52043.2021.9447388>
- [3] Dixit A – Jakhar S. K.: Airport capacity management: A review and bibliometric analysis, *Journal of Air Transport Management*, 2021/91 102010 <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.102010>
- [4] Atkin J. A. D. – Burke E. K. – Ravizza S.: The Airport Ground Movement Problem: Past and Current Research and Future Directions, *4th International Conference on Research in Air Transportation, Budapest 2010. június 1-4.*
- [5] Hanumantha G. J. – Arici B. T. – Sefair J. A. – Askin R.: Demand prediction and dynamic workforce allocation to improve airport screening operations, *IIE Transactions*, 2020/52 1324-1342 <https://doi.org/10.1080/24725854.2020.1749765>
- [6] Mujica Mota M. – Zuniga C.: A simulation-evolutionary approach for the allocation of check-in desks in airport terminals, *4th International Air Transport and Operations Symposium, Toulouse 2013. július.*
- [7] Araujo E. G. – Repolho M. H.: Optimizing the Airport Check-In Counter Allocation Problem, *Journal of Transport Literature*, 2015/9 <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n4a3>
- [8] Atkin J. A. D. – De Maere G. – Burke E. K. – Greenwood J. S.: Addressing the Pushback Time Allocation Problem at Heathrow Airport, *Transportation Science*, 2013/47 584-602 <https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0446>
- [9] Zhang M. – Huang Q. – Liu S. – Li H.: Multi-Objective Optimization of Aircraft Taxiing on the Airport Surface with Consideration to Taxiing Conflicts and the Airport Environment, *Sustainability*, 2019/11 6728 <https://doi.org/10.3390/su11236728>
- [10] Katsigiannis F. A. – Zografos K. G. – Fairbrother J.: Modelling and solving the airport slot-scheduling problem with multi-objective, multi-level considerations, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021/124 102914 <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102914>
- [11] Günther T. – Hildebrandt M. – Fricke H. – Strasser M.: Contributions of advanced taxi time calculation to airport operations efficiency, *Journal of Aerospace Operations*, 2011/1 95-106 <https://doi.org/10.3233/AOP-2011-0006>
- [12] Weiszer M. – Chen J. – Stewart P.: A multi-objective genetic algorithm for solving the airport ground movement problem, *4th Carpathian logistics congress, Podbanske 2014. szeptember 24-26.*
- [13] Kumar V. P. – Bierlaire M.: Multi-objective airport gate assignment problem in planning and operations, *Journal of Advanced Transportation*, 2014/48 902-926 <https://doi.org/10.1002/atr.1235>
- [14] Hu J. – Morais H. – Sousa T. – Lind M.: Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016/59 1207-1226 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>

- [15] Zhao N. – Duan M.: Research on airport multi-objective optimization of stand allocation based on simulated annealing algorithm, *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021/18 8314-8330 <https://doi.org/10.3934/mbe.2021412>
- [16] Bagamanova M. – Mota M. M.: A multi-objective optimization with a delay-aware component for airport stand allocation, *Journal of Air Transport Management*, 2020/83 101757 <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101757>
- [17] Skorupski J. – Żarów P.: Dynamic management of aircraft stand allocation, *Journal of Air Transport Management*, 2021/90 101964 <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101964>
- [18] Guépet J. – Acuna-Agost R. – Briant O. – Gayon J. P.: Exact and heuristic approaches to the airport stand allocation problem, *European Journal of Operational Research*, 2015/246 597-608 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.040>
- [19] Babić O. – Teodorović D. – Tošić V.: Aircraft Stand Assignment to Minimize Walking, *Journal of Transportation Engineering*, 1984/110 55-66 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1984\)110:1\(55\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1984)110:1(55))
- [20] Dijk B. – Santos B. – Pita J.: The recoverable robust stand allocation problem: a GRU airport case study, *OR Spectrum*, 2019/41 615-639 <https://doi.org/10.1007/s00291-018-0525-3>
- [21] <https://www.iata.org/en/policy/slots/slot-guidelines/> (2022. 01. 15.)
- [22] Anthonisse K. – Lageweg B.: Aircraft-stand allocation at Schiphol Airport: a decision support system, *DGOR/NSOR. Operations Research Proceedings*, 1987 257 [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73778-7\\_62](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73778-7_62)
- [23] Anthonisse K. – Lageweg B.: Aircraft-stand allocation at Schiphol Airport: an optimization procedure, *DGOR/NSOR. Operations Research Proceedings*, 1987 258 [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73778-7\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73778-7_63)
- [24] Qin Y. – Chan F. T. S. – Chung S. H. – Qu T. – Niu B.: Aircraft parking stand allocation problem with safety consideration for independent hangar maintenance service providers, *Computers & Operations Research*, 2018/91 225-236 <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.10.001>
- [25] Daş G. S. – Gzara F. – Stützle T.: A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches, *Omega*, 2020/92 102146 <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102146>
- [26] Benlic U. – Burke E. K. – Woodward J. R.: Breakout local search for the multi-objective gate allocation problem, *Computers & Operations Research*, 2017/78 80-93 <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.010>
- [27] Du J. – Hu M. – Yin J. – Zhang W.: Multi-Objective Gate Allocation Problem Based on Multi-Commodity Network Flow Model, *Applied Sciences*, 2022/12 9849 <https://doi.org/10.3390/app12199849>
- [28] Drexl A. – Nikulin Y.: Multicriteria airport gate assignment and Pareto simulated annealing, *IIE Transactions*, 2008/40 385-397 <https://doi.org/10.1080/07408170701416673>
- [29] Bolat A.: Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem, *Journal of the Operational Research Society*, 2001/52 1107-1120 <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601190>
- [30] Yang Y. – Gao Z.: Stochastic scheduling of ground movement problem integrated with taxiway routing and gate/stand allocation, *IET Intelligent Transport Systems*, 2022/16 1143-1163 <https://doi.org/10.1049/itr2.12192>
- [31] Aktel A. – Yagmahan B. – Özcan T. – Yenisey M. M., Sansarççı E.: The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem, *Transportation Research Procedia*, 2017/22 469-478 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.061>
- [32] <https://opensolver.org/> (2023.03.04)