

A repülőtéri állóhelyek kiosztásának optimalizálása többcélú lineáris programozással

A repülőtéri állóhelyek kiosztása többcélú optimalizálási folyamat, amely hatással van az üzemeltetés hatékonyságára, és gyors beavatkozást igényel változó körülményeknél (pl. késések kezelése kedvezőtlen időjárási körülmények esetén), különösen a forgalmas repülőtereken. A repülőtéri állóhelyek kiosztásának modellezése és optimalizálása jelentős tudományos alapú gazdasági eredmény.

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2024.1.4>

Hegyi Patrik – Dr. Csonka Bálint

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
e-mail: hegyip@edu.bme.hu, csotka.balint@kjk.bme.hu

1. BEVEZETÉS

Az állóhelyek kiosztása a légiforgalmi menedzsment feladata, amely 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 az 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 zsúfolt repülőtereken. A kapacitást úgy kell elosztani, hogy a repülőtér magas színvonalon ki tudja elégíteni a keresletet, és minimálisra csökkentse a zavarok és a keresletcsúcsok negatív hatásait. A napi járatok nagy száma és a kiosztás összetettsége (pl. a repülőgépek mére-

te és a légitársaságok preferenciái) miatt a kézi kiosztás nem hatékony. Ezért felmerül az igény az állóhelykiosztó eljárásokra.

Az optimalizálási módszereket széles körben használják kapacitáskorlátozott környezetben [1], [2]. Ebben a cikkben egy egészértékű lineáris programozási modellt és optimalizáló módszert mutatunk be 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 puffertidők meghatározásával, az utasok gyaloglási távolságát és a légitársaságok preferenciáit, ami a fő újdonságot jelenti.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az elmúlt két évtizedben a légi közlekedésben jelentősen megnőtt a kereslet, ami a nagy repü-

lőterek 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 állóhelykiosztási 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 egyesíthetők a Bayes-modellezés és a metaheurisztika előnyeivel, 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 repülőtereken 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 repülőter-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]
- autóbuszos 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 köze-

pes (≈ 10 millió utas évente) kínai repülőtér többszempontú 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 állóhelykiosztási terv elkészítése összetett, többszereplős művelet, ugyanakkor nincs rá olyan iránymutatás, mint a résidőkiosztásra [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 kvadratikuss, több szempontú programozási probléma, ami 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 részhalmazának azonosítása, amely maximális nyereséget és megvalósítható parkolási ütemtervet biztosít egy csúcsonapon [24]. A feltételezés szerint a repülőgépek mozgása között nem lehet átfedés, és az ütközés kockázatát az egyes repülőgéppárok közötti legrövidebb távolság alapján minimalizálni kell. A repülőgéppárok közötti átfedés megakadályozására No-Fit Polygon (NFP) mechanizmust használták. Kétlépcsős MIP-megközelítést alkalmaztak, amelyben az első modell a karbantartási megbízások azon részhalmazának megtalálására szolgált, amely a legnagyobb tartalékkal rendelkezik, míg a második modell a felülvizsgált NFP-k alapján maximalizálja a teljes biztonsági tartalékot.

Az állóhelyek beszélő kapukon keresztül érhetők el, ezért ezeket az állóhelyek

mellett járatokhoz is kell rendelni. A járatok kapukhoz való hozzárendelésének feladatát kapuhozzárendelési 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].

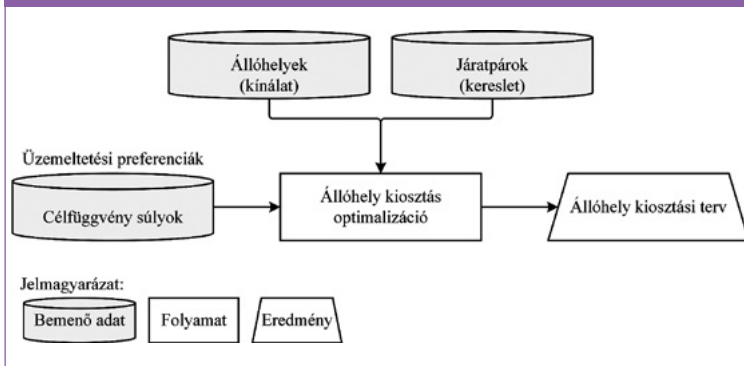
A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítottuk, hogy a korábbi tanulmányok leggyakrabban viszonylag kevés célfüggvényt határoztak meg. Kutatási hiányosságként azonosítottuk az átfogó, minden egyes érdekelt fél szempontjait figyelembe vevő többcélú függvény alkalmazását.

3. FIZIKAI MODELL

Az állóhelykiosztás folyamatát az 1. ábrán foglaltuk össze.

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.

1. ábra: Az állóhelykiosztás fizikai modellje



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 állóhelykiosztási terv ellenálló képességét 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 kémeny 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.

4. MATEMATIKAI MODELL

4.1. Lineáris programozási modell

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

$$\begin{aligned} f(x) &= cx^T & (1) \\ Ax &\leq b \text{ és } x \geq 0 & (2) \end{aligned}$$

4.1.1. 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_i : elhagyás költsége
- t_{wi} : gyaloglási idő (a terminál bejárata és az állóhelyhez tartozó beszállítókapu között)
- t_{si} : gurulási idő
- c_{si} : 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 nagyobb légitársasági elégedettséget jelentenek.

4.1.2. 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 szemléltettük.

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 ($i: 1...20$) bináris változó van.

4.1.3. Korlátozások

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

- 1. Egy járat csak egy állóhelyre lehet beosztva és minden járatához 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).

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

$$x_i \cdot f_i \leq s_c \tag{5}$$

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

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

4.2. Célfüggvények

Hat célfüggvényt határoztunk meg, figyelembe véve a repülőter, a légitársaságok és az utasok szempontjait.

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

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

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

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

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

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

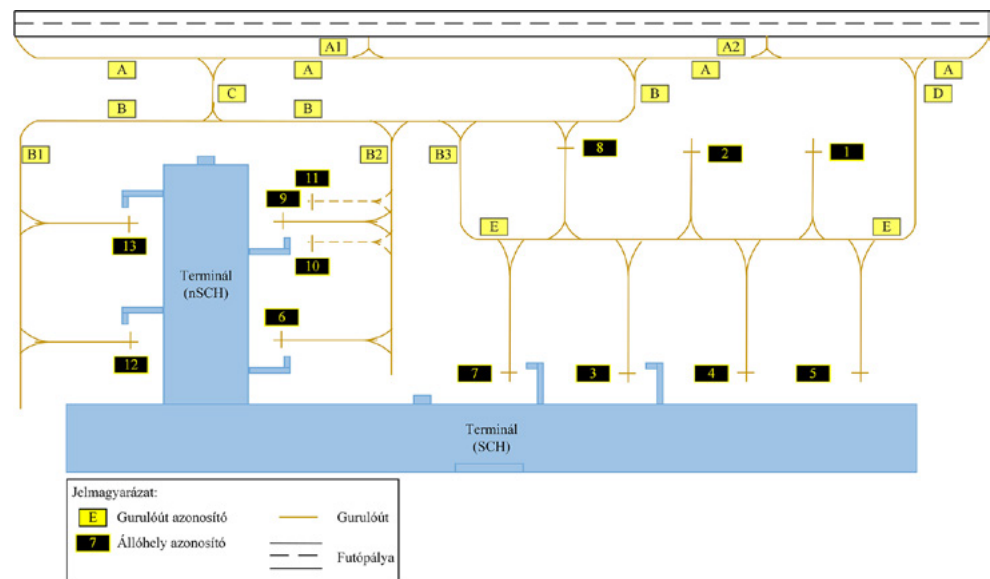
$$\max f_5(x_i) = \sum_{i=1}^{nm} c_{pr,i} \cdot x_i \tag{12}$$

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

4.3. Többcélú optimalizálás

Az optimális megoldást minden cél szerint külön-külön meghatároztuk, majd a célokhoz súlyokat rendeltünk ($w_1...w_6$). Ezután a súlyo-

2. ábra: Modellezett repülőtér (nem mérettartó)



zott célfüggvényeket azonos skálára transzformáltuk, és a következők szerint összegeztük. (14).

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

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.

5. ESETTANULMÁNY

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

5.1. A minta repülőtér

A modellezett repülőtér elrendezését a 2. ábrán szemléltetjük.

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

- C, D: ICAO légi jármű-kategóriák
- PB: hátratólás szükséges
- PO: önjáró (nem szükséges hátratólás)
- B: autóbuszos beszállítás
- AB: utashidas beszállítás
- W: gyalogos beszállítás
- SCH: schengeni zóna
- nSCH: nem schengeni zóna
- - : mindkét zóna

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

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

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 állóhely (1, 3, 9 és 13) költségeit mutatjuk be.

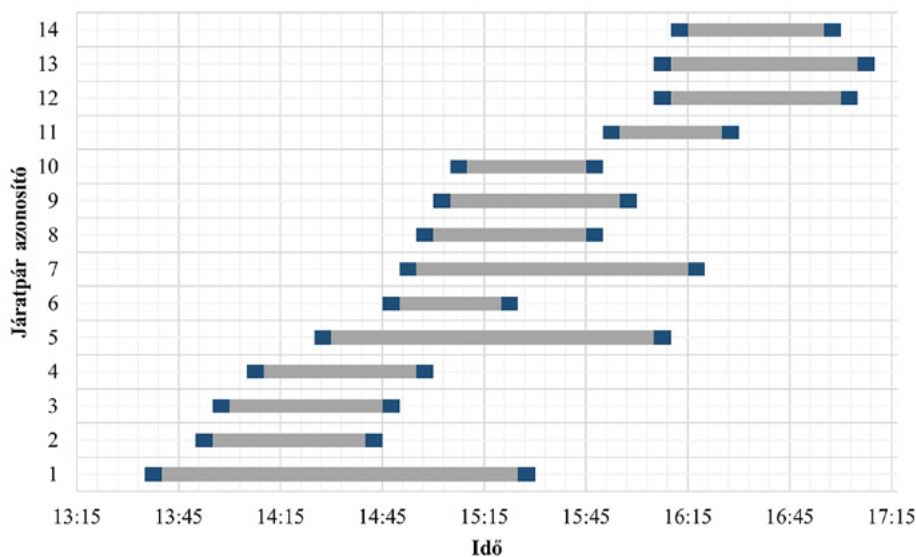
5.2. Menetrend

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

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

3. táblázat: Az 1; 3; 9; 13 állóhelyek költségei					
s_{ID}	c_s	c_h+c_l	t_{wt}	t_{st}	c_{st}
1	25	80	67	50	0
3	100	130	200	80	10
9	100	130	333	40	10
13	100	130	400	40	10

3. ábra: A járatpárok érkezési és indulási időpontjai



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

4. táblázat: Optimális célfüggvény értékek (célértékek)

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

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

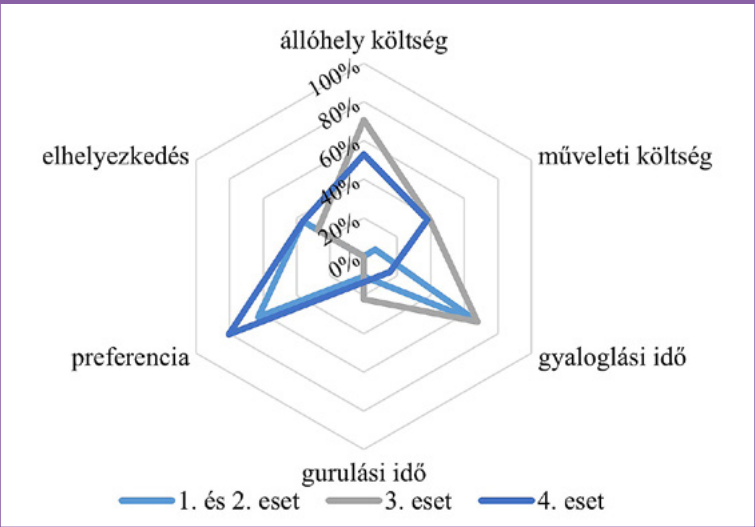
Összesen 4 súlyozási esetet elemeztünk:

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

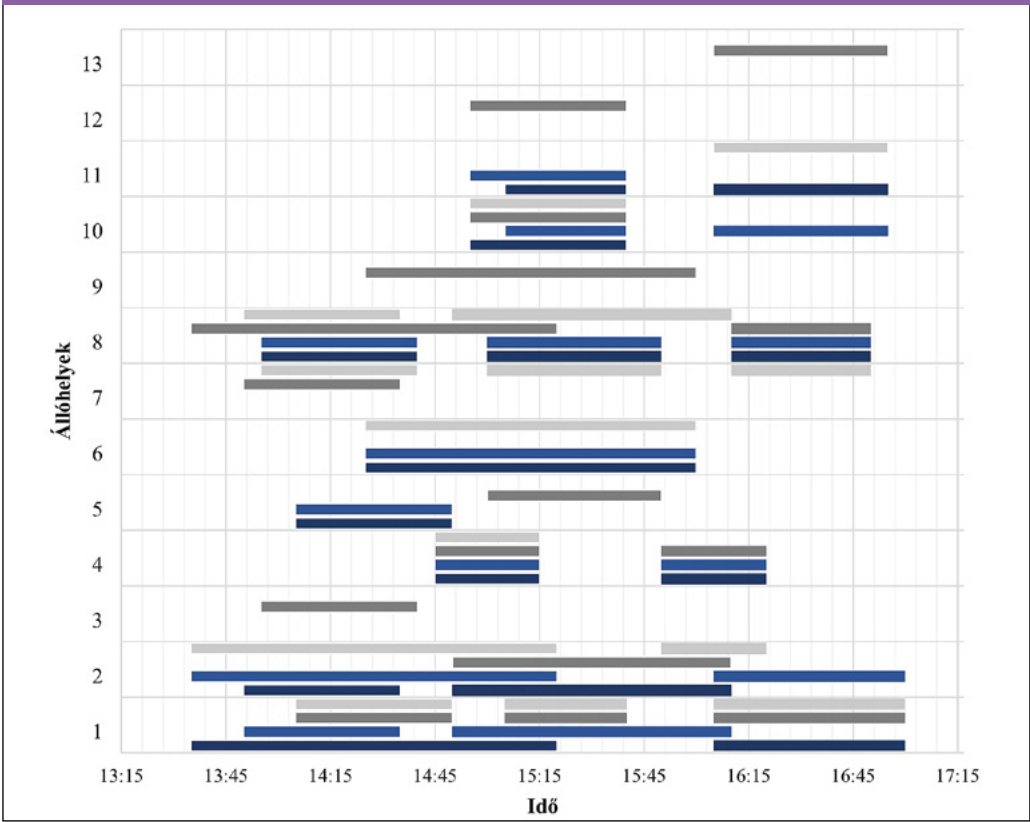
Az alkalmazott súlyokat az 5. táblázatban mutatjuk be.

Minden egyes súlyozási esethez egy-egy hozzárendelést végeztünk el.

4. ábra: Az optimális értékektől való eltérések



5. ábra: Állóhelykiosztási terv



Az optimális értékekhez (Z_i) képesti eltéréseket a 4. ábrán illusztráljuk.

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.

A leginkább terhelt állóhely a 8-as azonosítóval rendelkező, összesen három járat lett rá kiosztva. A foglaltsági idő tekintetében a legmagasabb átlagérték 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 öt állóhelyre nem lett kiosztva repülőgép. Ezzel szemben a harmadik esetben csak két állóhely maradt üresen.

6. 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 jövőbeni kutatásaink során.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Földes D. – Csiszár Cs.: Assessment Method for Individual Value of a Location, *Transportation Research Procedia* 2017/27 814-848 DOI: <https://doi.org/k2rj>
- [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. DOI: <https://doi.org/k2rk>
- [3] Dixit A – Jakhar S. K.: Airport capacity management: A review and bibliometric analysis, *Journal of Air Transport Management*, 2021/91 102010 DOI: <https://doi.org/gpinq6>
- [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 DOI: <https://doi.org/k2rm>
- [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 DOI: <https://doi.org/k2rn>
- [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 DOI: <https://doi.org/k2rp>
- [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 DOI: <https://doi.org/gm88nj>
- [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 DOI: <https://doi.org/k2rq>
- [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 DOI: <https://doi.org/k2rr>
 - [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 DOI: <https://doi.org/k2rs>
 - [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 DOI: <https://doi.org/f79wqk>
 - [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 DOI: <https://doi.org/k2rt>
 - [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 DOI: <https://doi.org/k2rv>
 - [17] Skorupski J. – Żarów P.: Dynamic management of aircraft stand allocation, *Journal of Air Transport Management*, 2021/90 101964 DOI: <https://doi.org/gmqvvn>
 - [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 DOI: <https://doi.org/k2rw>
 - [19] Babić O. – Teodorović D. – Tošić V.: Aircraft Stand Assignment to Minimize Walking, *Journal of Transportation Engineering*, 1984/110 55-66 DOI: <https://doi.org/fsddcf>
 - [20] Dijk B. – Santos B. – Pita J.: The recoverable robust stand allocation problem: a GRU airport case study, *OR Spectrum*, 2019/41 615-639 DOI: <https://doi.org/k2rx>
 - [21] IATA - International Air Transport Association (2022): Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG), URL: <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 DOI: <https://doi.org/k2rz>
 - [23] Anthonisse K. – Lageweg B.: Aircraft-stand allocation at Schiphol Airport: an optimization procedure, *DGOR/NSOR. Operations Research Proceedings*, 1987 258 DOI: <https://doi.org/k2r2>
 - [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 DOI: <https://doi.org/gcxswx>
 - [25] Daş G. S. – Gzara F. – Stütze T.: A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches, *Omega*, 2020/92 102146 DOI: <https://doi.org/k2r3>
 - [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 DOI: <https://doi.org/f9g6j9>
 - [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 DOI: <https://doi.org/k2r4>
 - [28] Drexler A. – Nikulin Y.: Multicriteria airport gate assignment and Pareto simulated annealing, *IIE Transactions*, 2008/40 385-397 DOI: <https://doi.org/fvb5gh>
 - [29] Bolat A.: Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem, *Journal of the Operational Research Society*, 2001/52 1107-1120 DOI: <https://doi.org/df4t5g>

- [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 DOI: <https://doi.org/k2r5>
- [31] Aktel A. – Yagmahan B. – Özcan T. – Yenisey M. M., Sansarccı E.: The comparison of the metaheuristic algorithms performances on airport gate assignment problem, Transportation Research Procedia, 2017/22 469-478 DOI: <https://doi.org/k2r6>
- [32] <https://opensolver.org/> (2023.03.04)



Optimizing airport stand allocation using multi objective linear programming

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.



Optimierung der Standplatzzuteilung am Flughafen mittels multiobjektiver linearer Programmierung

Die Zuweisung von Flughafenstandplätzen ist ein Optimierungsprozess mit mehreren Zielen, der sich auf die betriebliche Effizienz auswirkt und ein schnelles Eingreifen bei sich ändernden Umständen erfordert (z.B. Bewältigung von Verspätungen bei ungünstigen Wetterbedingungen), insbesondere an stark frequentierten Flughäfen. In unserem Artikel modellieren und optimieren wir die Zuweisung von Flughafenstandplätzen, was dem Artikel seinen wissenschaftlichen Wert verleiht. Wir stellen den Prozess und das Problem der Zuteilung von Flughafenstandplätzen vor, wobei wir uns besonders auf die Faktoren konzentrieren, die die Zuteilung beeinflussen. Wir entwickeln ein lineares Programmiermodell für die Zuteilung von Standplätzen, definieren die Randbedingungen und die Zielfunktionen und berücksichtigen dabei unter anderem die Kosten für die Nutzung der Standplätze und die Gehzeit der Passagiere. An einem fiktiven Flughafen haben wir die unterschiedlichen Standplatztypen modelliert und die Zuteilung der Standplätze optimiert. Durch Änderung der Gewichte der Zielfunktionen der Mehrzieloptimierung haben wir vier Fälle untersucht. Durch das Ergebnis der Gewichtung kann die Verteilung der Standplätze auf verschiedene Weise optimiert werden.