

Hierarchikus légiforgalmi irányító ágens tervezése légiforgalmi szimulációs keretrendszerhez

Jáger Rebeka Anna* Szabó Géza**

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
(e-mail: rjager@edu.bme.hu)

** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
(e-mail: szabo.geza@kjk.bme.hu)

Absztrakt: Az automatizált légiforgalmi irányítási megoldások fejlesztésének előrehaladtával egyre nagyobb szükség van olyan rugalmas és valóságghű szimulációs környezetekre, amelyek lehetővé teszik az új koncepciók összehasonlítását és validálását. A jelenlegi eszközökben gyakran korlátozott a valódi forgalmi adatok integrálása, a jól definiált interfészek hiánya nehezíti az algoritmusok beillesztését, illetve kevésbé támogatják a programozható irányítói műveleteket. Ezen igények mentén kifejlesztésre került egy szimulációs keretrendszer, amely a légiforgalmi irányítás modellezését két szinten végzi. A forgalommodellezési réteg feladata a légijárművek pozíciójának becslése, miközben az irányítói rétegnek lehetősége van a definiált interfészen keresztül instrukciókkal módosítani a forgalomáramlást. Az itt kidolgozásra kerülő irányítói ágens ezen a keretrendszeren keresztül végzi a forgalom irányítását. Az irányítói ágens a jelenlegi irányítási struktúrát modellezi, az SV (Supervisor), tervező és végrehajtó irányítói funkciókon keresztül. Az irányítói ágens más definiálásával az automatizált irányítással együttműködő emberi irányítás is modellezhető. A szimulációs keretrendszer a forgalom komplexitására vonatkozó adatok biztosításával lehetővé teszi a szektorizáció vizsgálatát a jelenlegi és az automatizált scénáriókra vonatkozóan.

1. BEVEZETÉS

A légiforgalmi irányítás (ATC – Air Traffic Control) automatizálási törekvései elsősorban a döntéstámogatásra irányulnak, meghagyva az emberi szereplőt döntéshozóként. Az automatizált eszközök (tool-ok) segítséget nyújthatnak a forgalom figyelésében (pl. CLAM – Cleared Level Adherence Monitoring, RAM – Route Adherence Monitoring), az elkülönítési minimumok sérülésének megelőzésében, szükség esetén riasztó funkcióval (pl. STCA – Short Term Conflict Alert, APW – Area Proximity Warning), átvehetnek monoton feladatokat (pl. ATIS – Automatic Terminal Information Service). A legújabb rendszerek már javasolhatnak is konfliktusfeloldási lehetőségeket, azonban a javaslat elfogadása emberi felelősség marad.

A jelenlegi légiforgalmi irányítási rendszerben az irányítók párokban dolgoznak a szektorban (a toronyirányítás kivételével). A végrehajtó irányító (EC, Executive Controller) a légijárművekkel való kommunikációt végzi, a kiadott utasításokkal úgy rendezi a forgalmat, hogy a rövidtávú konfliktuselkerülést biztosítsa. A tervező irányító (PC, Planning Controller) nagyobb időtávon (10-20 perc) végzi a forgalom konfliktusmentesítést, előkészíti a forgalmi helyzetet, a szomszédos szektorokkal vagy más ATS (Air Traffic Service, légiforgalmi szolgáltató) egységekkel (pl. repülőterek) kommunikál.

A szektorizáció oka az irányítói páros munkaterhelésének limitálása. Így az adott irányítói páros felelőssége alá kisebb (feltételezhetően kevésbé komplex) légtér-rész tartozik, amely lehetővé teszi az emberi munkavégzés elvárhatóan biztonságos szinten történő folytatását. A szektorban jelen lévő forgalom okozta munkaterhelést, azaz a forgalom komplexitását számos tényező befolyásolja. Függhet a szektor elhelyezkedésétől, például egy felső szektor esetében kis forgalom nagyságú, főként egyenes irányú, átrepülő forgalom van jelen, amely nem jelent nagy komplexitást. Ezzel szemben az alsó szektorok komplexitását növelhetik a szomszédos légtérből (pl. nem ellenőrzött légtér) ki- és belépő forgalmak, elkülönített légtérek aktiválódása, gyakori időjárás jelenségek, amelyet a légijárművek kerülni kezdenek. A szektor komplexitásának, illetve az ebből fakadó tényleges munkaterhelés pontosabb meghatározásához a szakirodalom számos módszertant mutat be a releváns paraméterek kiválasztására és validálására. Számel et al. légiforgalmi irányítók kérdőívezésével állított fel a szektor komplexitását meghatározó, munkaterheléshez hozzájáruló paraméterkészletet (pl. emelkedő/süllyedő légijárművek száma, aránya, forgalom térbeli eloszlása, konfliktuspontok száma, sebességek szórása), (Számel et al., 2015). Széles körben alkalmazott az Eurocontrol CAPAN módszertana (Flynn et al., 2003), amely az irányító által elvégzendő feladatok időigényén keresztül becsli a szektor komplexitását és így a szektor megengedhető kapacitását. A másik lehetőség a forgalom által ténylegesen okozott munkaterhelésre és



CAETS

„XIX. IFFK 2025”

Online: ISBN 978-615-82688-0-6

Paper 10

Copyright 2025 Budapest, MMA.

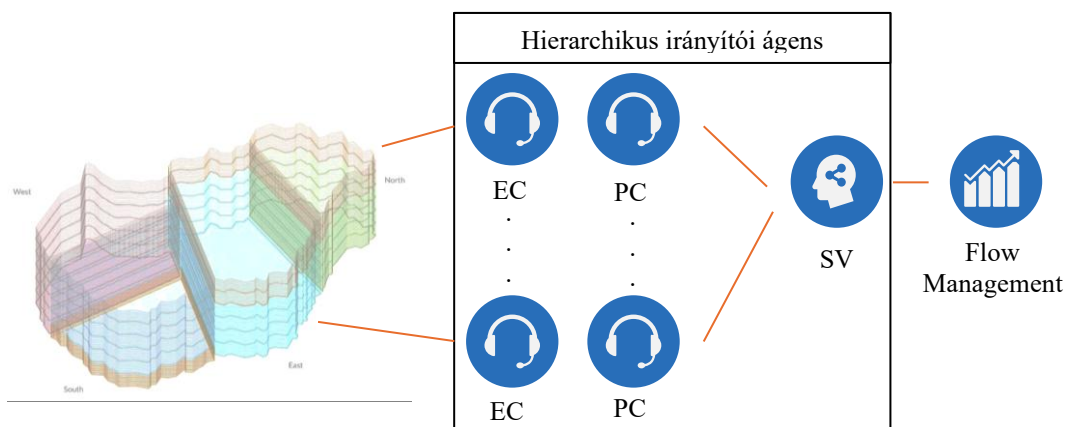
Editor: Dr. Péter Tamás

helyzettudatosságra való következtetés a különböző fiziológiai jelek méréséből (pl. szemmozgás követés) (Kale et al., 2018).

A korábban bemutatott automatizálási struktúra (Jáger & Szabó, 2023) egy köztes automatizálást céloz meg a teljes automatizálás előtt. Implementálásra kerül egy gépi irányítás, amely az emberhez hasonlóan képes az irányítási funkciók végrehajtására, azonban még nem egyedül, hanem az emberi irányítóval együtt dolgozik, a térben elosztott feladatokat felosztva: a jól specifikálható irányítási feladatokat teljes egészében az automatizmus hajtja végre, de a specifikációs téren kívüli feladatok megoldása a rendszerben maradó humán irányítóra hárul. Ezt a megoldást az teszi lehetővé, hogy a légiforgalmi irányításban szükséges irányítási beavatkozások térben és időben elkülöníthetők egymástól. Így az emberi irányító nem felügyeleti funkciót lát el, hanem továbbra is

aktív résztvevője a teljes légiforgalomra vonatkozó átfogó irányítási feladatnak, míg az automatizmus egyes irányítási feladatokat (várhatóan az irányítói feladatok jelentős részét) önállóan, minden külső felügyelet nélkül végez el. A feladatfelosztási algoritmus a munkaterhelés és a helyzetudatosság optimális szinten tartása érdekében olyan feladatokat is átad a humán irányítónak, amit az automatizmus is biztonságosan végre tudna hajtani.

Jelen tanulmány megvizsgálja, hogy az ezen automatizálási koncepció vizsgálatára és tesztelésére szolgáló szimulációs környezetben hogyan modellezhető egy olyan hierarchikus ágens, amely az 1. ábra szerint a jelen ATC működést képezi le az irányítói párosok és supervisorok valamint a flow management kapcsolatával.



1. ábra. A hierarchikus irányítói ágens által megvalósított leképezés helye a valós folyamatban

2. SZIMULÁCIÓS KERETRENDSZER

A korábban bemutatásra került (Jáger & Szabó, 2025) szimulációs keretrendszer több szinten valósítja meg a légiforgalmi irányítás modellezését, amelybe ágensek bekapcsolásával nyílik lehetőség különböző irányítási formák – pl. automatizált irányítás – modellezésére. A 2. ábra tartalmazza a forgalom-szimulációs réteg funkcióinak áttekintését és bemutatja az irányítói ágens helyét.

A szimulációs keretrendszer az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

- valós forgalmi adatok használatával lehetővé teszi a valós forgalmi tulajdonságokra épülő validációt,
- a forgalom előrebecslésével képes az irányított forgalomból irányítatlan forgalmi igényt generálni, ezzel azt a forgalmat reprezentálva, amellyel az irányítói ágens a valóságban találkozna,
- ágens alapú felépítéssel könnyen implementálhatóak egyedi irányítói algoritmusok,
- jól definiált interfészek biztosítják az adattartalomhoz való átlátható hozzáférést.

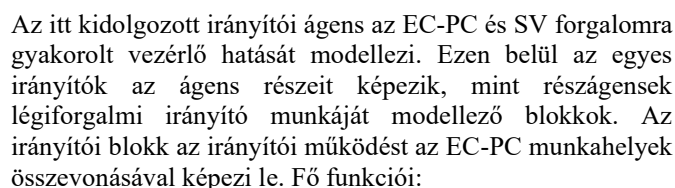
Az irányítói ágens működését a 3. ábra mutatja be közelebbről. A szimuláció továbbítja a forgalmi képet az ágens számára, amelynek ez után van lehetősége feldolgozni azt, valamint a saját forgalomrendezésre vonatkozó szabályrendszere alapján az utasításokat meghatározni. A szimulációs rétegben ugyanazon interfész képes az utasításokkal kibővített adatok fogadására.

3. IRÁNYÍTÓI ÁGENS KIDOLGOZÁSA

3.1 Konfliktusfeloldási algoritmusok

A konfliktusfeloldási algoritmusokra négy megközelítés különböztethető meg. A geometrikus algoritmusok egyszerű geometriai modellek segítségével vizsgálják légi járművek mozgását, és az ütközésveszélyt a pályák metszéspontjainak, távolságainak, illetve a legközelebbi megközelítési pont (Closest Point of Approach, CPA) meghatározásával elemzik. Előnye a gyors számíthatóság, de nem feltétlenül optimális megoldást ad. Az optimális irányítás a konfliktusfeloldást formális optimalizációs keretben kezeli, ahol egy költségfüggvény (pl. üzemanyag-felhasználás, útvonalhossz vagy késés minimalizálása) mellett biztosítja a szeparáció fenntartását. Matematikai programozási és vezérlésméleti módszereket használ, így komplexebb, de potenciálisan hatékonyabb megoldásokat kínál. A hagyományos

algoritmikus szabályrendszer alapú megközelítést alkalmaz, mivel ez a leginkább összeegyeztethető a jelenlegi irányítói gyakorlat formalizált leképezésével, továbbá lehetővé teszi az ágens teljesítményének közvetlen összevetését a humán irányítók által használt módszerekkel.

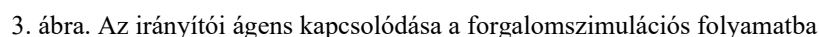


- ### 3.1 Az elkülönítési minimumok értelmezése

- a) ütközések megelőzése légijárművek között,
- b) ütközések megelőzése légijárművek között, valamint légijárművek és akadályok között a munkaterületen,
- c) a forgalom rendezett áramlásának felgyorsítása,
- d) tanácsadás és információszolgáltatás a repülések biztonságos és hatékony lebonyolításához,
- e) a megfelelő szervezetek értesítése és szükség szerinti támogatása a kutatás-mentésre szoruló légijárművek kapcsán.

A szimulációban megvalósítandó irányítói ágens kiszolgálja az a) pontot, mint a távolkörzeti irányításban az ütközésselkerülési funkciót, az elkülönítési minimumok tartásán keresztül. A szimulációban ezt az ICAO Doc 4444 alapján FL 290 és FL 410 között RVSM légtérben értelmezve vízszintesen 5 nm, függőlegesen 1000', a 4. ábra szerint.

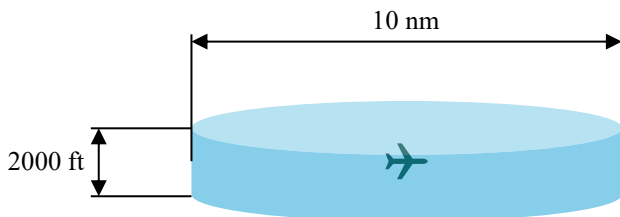
A mély megerősítéses tanulás alapú algoritmusok gépi tanulási alapú megközelítésen alapulnak, amely szimulációk sokaságán keresztül tanulja meg a konfliktusfeloldási stratégiákat. Képes adaptív döntéshozatalra, különösen komplex és dinamikus forgalmi helyzetekben, ugyanakkor a tanítási folyamat számításigényes, és a validáció kihívást jelent (Wang et al., 2022). Ribeiro et al. a konfliktus detektálási feloldási eljárások részletes csoportosítását mutatja be (Ribeiro et al., 2020). Az irányítói ágens hagyományos



3.2 Konfliktusfeloldási algoritmus tervezése

A potenciális elkülönítési minimum sérülések – konfliktusok – a következők:

- Két légitársaság azonos szinten – keresztező konfliktus,
- Két légitársaság azonos szinten – konvergáló konfliktus,
- Legalább az egyik légitársaság olyan magasságra emelkedik vagy süllyed, amely során keresztezi egy másik légitársaság szintjét,
- Két légitársaság vertikálisan elkülönítve, ahol legalább az egyiknek olyan repülési szintre kell engedélyt adni, amellyel keresztezné a másik szintjét.



4. ábra. Az elkülönítési minimum értelmezése

A konfliktusok felsorolás szerinti típusait az 1. táblázat illusztrálja egy-egy példával. Az elkülönítési minimum sérülés megelőzésre rendelkezésre álló alapvető irányítói technikák:

1. Szintváltás
2. Sebességmégkötés
3. Vektorálás
4. Direkt útvonal adása
5. Vertikális sebességmégkötés

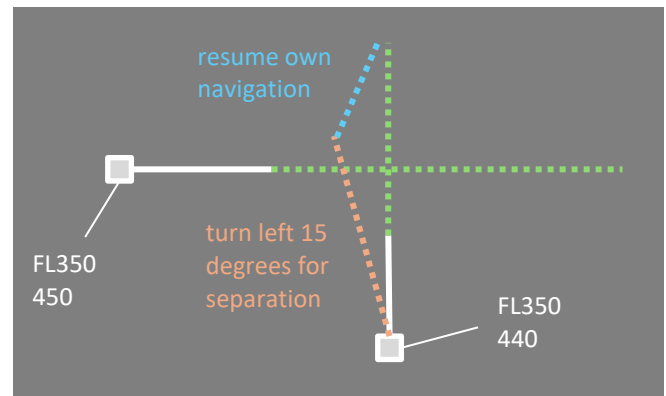
Szintváltás alkalmazásakor, keresztező konfliktus esetén csak rövid ideig szükséges a másik repülési szint használata, így az lehet az ellentétes irányhoz tartozó is. Konvergáló konfliktus esetén ez nem megengedhető, így legalább 2000' szintváltás szükséges.

A gyakorlatban sebességmégkötés csak középtávon használható konfliktusfeloldásra vagy az elkülönítés megtartására, mivel hatásának érvényesülése több időbe telik, valamint korlátozza a légitársaságok szokásos utazási sebessége. Az eredménye kevésbé látványos, mint más technikáké, így az irányítótól további figyelemmel kísérést kíván meg. Emiatt a sebességmégkötés körültekintően alkalmazandó gyakorlat, így az irányítói ágens mellőzi ezt a módszert.

Vektorálás során a légitársaság a saját koordináta-rendszerében meghatározott mértékű és irányú fordulást végez, majd miután a vektorálás célja teljesült, visszatér az útvonalára, az 5. ábrán bemutatott módon. A módszert korlátozhatja a konfliktus környezetében található időjárás vagy tiltott légtér.

Direkt útvonal adása esetén a repült útvonal lerövidül, a légitársaság megkezdheti útját a repülési tervében jelzett következő útvonalpont felé. Ez a vektoráláshoz hasonlóan feloldhatja a konfliktust bizonyos esetekben, ugyanakkor a gyakorlatban mivel lerövidíti a repült útvonalat, így a kiszámolt érkezési idő előtt érhet a következő szektorba a légitársaság, ezzel annak túlterhelődését okozva a várt forgalomhoz képest. Többlet koordinációt igényelhet szektorok között, ha az útvonalpont a szektoron kívül helyezkedik el, valamint a légitársaság által várt körülményekhez képest mással találkozhat – pl. erős széllel. Ezért az irányítói ágens nem alkalmaz direkt útvonal adást.

Vertikális sebességmégkötés akkor alkalmazható hatékonyan, ha az egyik légitársaság keresztezi a másik repülési szintjét. Az emelkedési vagy süllyedési ráta megkötése megfelelő ráhagyással történhet, arra az esetre, ha a légitársaság nem pontosan tartja be azt. Általánosságban a légitársaságok könnyebben tartják a süllyedési rátát, az emelkedési ráta a légitársaság személyzetével való egyeztetést igényelhet.



5. ábra. Konfliktus feloldása vektorálással

A gyakorlatban sokszor ezen technikák kombinációjára van szükség. Az irányítói ágens működésében először meghatározza a konfliktus típusát, majd az 1. táblázatban foglalt döntési tábla szerint konfliktusfeloldást alkalmaz.

Keresztező konfliktus feloldásánál az irányítói ágens először ellenőrzi, hogy ha az alsó légitársaságot süllyeszti, vagy a felső légitársaságot emeli, akkor keletkezik-e újabb konfliktus. Amennyiben nem, úgy a prioritási sorrendben a szintváltás az első lépés. Ha a szintváltás a konfliktusok számának emelkedéséhez vezet, akkor a prioritási sorrend szerint a következő feloldási technika a vektorálás, mely során az ágens kiszámítja azt a lehető legkisebb szöveget, amellyel a lassabb légitársaságot a gyorsabb felé forgatva fent fog állni az előírt elkülönítési minimum.

A két légitársaság pozícióját megadó vektorok:

$$\mathbf{p}_A = (lat_A, lon_A), \quad \mathbf{p}_B = (lat_B, lon_B).$$

Sebességük a földhöz viszonyítva:

$$v_A, v_B [m/s].$$

1. táblázat. Döntési tábla a konfliktus típusától függően választott feloldási technikához

Konfliktus típusa	Illusztráció	Alkalmazott feloldási technikák
Két légitármű azonos szinten – keresztező konfliktus.		1. Szintváltás (2000'), ha új konfliktus keletkezik: 2. Vektorálás – a legkisebb íránymódosítás, amivel az elkülönítési minimum sérülés megelőzhető, a lassabb légitármű forgatása a gyorsabb felé.
Két légitármű azonos szinten – konvergáló konfliktus.		A keresztező konfliktussal megegyező módon.
Legalább az egyik légitármű olyan magasságra emelkedik vagy süllyed, amely során keresztezi egy másik légitármű szintjét.		Vertikális sebességmégkötés
Két légitármű vertikálisan elkülönítve, ahol legalább az egyiknek olyan repülési szintre kell engedélyt adni, amellyel keresztezné a másik szintjét.		Vertikális sebességmégkötés

Írányuk a mágneses északtól (óramutató járásával megegyezően) fokban:

$$\psi_A, \psi_B.$$

A pozíciókat a kis távolságok miatt síkbeli, lineáris közelítéssel lokális koordináta-rendszerbe átszámítva:

$$x = (lon - lon_0) \cdot m_{per_deg_lon},$$

$$y = (lat - lat_0) \cdot m_{per_deg_lat}.$$

Ahol $m_{per_deg_lon}$ és $m_{per_deg_lat}$ annak a közelítő számítása, hogy 1° szélesség és 1° hosszúság a Föld felszínén hány méternek felel meg. Az implementációban a MATLAB Mapping Toolbox *lla2ecef* és *ecef2lla* függvényei végzik az átszámítást Földközéppontú derékszögű (ECEF) koordináta rendszerbe.

A sebességvektorok:

$$\mathbf{v}_A = v_A \begin{bmatrix} \sin \psi_A \\ \cos \psi_A \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_B = v_B \begin{bmatrix} \sin \psi_B \\ \cos \psi_B \end{bmatrix}.$$

A két légitármű relatív helyzete és sebessége:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{p}_A - \mathbf{p}_B, \quad \mathbf{v}_r = \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B.$$

A legközelebbi megközelítéshez eltelt idő:

$$t_{CPA} = -\frac{\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{v}_r}{\|\mathbf{v}_r\|^2} \quad (1)$$

Ekkor a minimális távolság a két légitármű között (Closest Point of Approach):

$$d_{CPA} = \|\mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_r t_{CPA}\| \quad (2)$$

Az elforgatáshoz a lassabb légitármű sebességvektora legyen

$$\mathbf{v}'_A(\Delta\psi) = v_A \begin{bmatrix} \sin(\psi_A + \Delta\psi) \\ \cos(\psi_A + \Delta\psi) \end{bmatrix} \quad (3)$$



CAETS

„XIX. IFFK 2025“

Online: ISBN 978-615-82688-0-6

Paper 10

Copyright 2025 Budapest, MMA.

Editor: Dr. Péter Tamás

ahol a megoldás a legkisebb $|\Delta\psi|$, amelyre $d_{CPA}(\Delta\psi) \geq 5 \text{ nm}$.

Konvergáló konfliktus esetén az ágens a keresztező konfliktus feloldásával analóg módszert (prioritási sorrendet) alkalmaz, amely biztosítja, hogy a légi járművek vagy szintben elkülönítve haladjanak az útvonalakon tovább, vagy vektorálás után szekvenciában egymás után haladjanak.

Azokban az esetekben, amikor két légi jármű egymás szintjét keresztezi, az ágens vertikális sebességmégkötést alkalmaz úgy, hogy a vízszintes és függőleges elkülönítési minimumok közül legalább az egyik teljesüljön. Ehhez a horizontális relatív helyzet ($\mathbf{r}_0$) és relatív sebesség ($\mathbf{v}_r$) használatával meghatározandó a legközelebbi horizontális megközelítés ideje az (1) egyenlet szerint. Az ekkor a (2) egyenlet szerint számított legkisebb távolság a horizontális elkülönítés, ennek sérülése esetén biztosítandó a vertikális elkülönítés. Ehhez a kezdeti magasságkülönbség

$$\Delta z = z_1 - z_2$$

így a magasságkülönbség CPA időben:

$$\Delta z(t_{CPA}) = \Delta z_0 + \left(\frac{v_{SA} - v_{SB}}{60} \right) t_{CPA} \quad (4)$$

ahol v_{SA} és v_{SB} a légi járművek vertikális sebessége [láb/perc] dimenzióban. A (4) egyenletet a következő feltétel szerint:

$$|\Delta z(t_{CPA})| \geq 1000 \text{ ft}$$

egyik légi jármű vertikális sebességét rögzítve adódik az a megengedett vertikális sebesség intervallum, amelyből az ágens a légi jármű jelenlegi (vagy tervezett) vertikális sebesség legkisebb módosítását igénylőt választja.

A forgalomszimulációs réteg képes a légi járművektől érkező véletlenszerű kérések generálására, ezzel jobban modellezve az olyan, a repülést befolyásoló tényezőket, mint pl. a légköri viszonyok, időjárás. Az itt kidolgozásra kerülő irányítói ágens algoritmus engedélyezi ezeket a kéréseket, amennyiben nem vezet a konfliktusok számának növeléséhez 10 perces időablakban.

4. AZ IRÁNYÍTÓI ÁGENS MŰKÖDÉSE

A szimulációs környezet 2025 április 1. archív adatait felhasználva Magyarország légerét kiválasztva került futtatásra. Az irányítói ágens munkaterhelése közelíthető a forgalomban fellépő konfliktusok számával és típusával. Ezen adatok a működésből adódóan rendelkezésre állnak, az ágens szintjén rögzítettek. Emellett a szimulációs környezet beépített módon képes néhány KPI (Key Performance Indicator) számítására és rögzítésére:

- elkülönítési minimum sérülések száma,
- kiadott ATC utasítások száma,
- a szektorban lévő légi járművek száma.

A felsorolt indikátorok, valamint a konfliktusok megoszlása típus szerint a 6. ábrán látható. Az irányítói ágens alacsony és közepes forgalmi terhelés mellett hatékonyan működik: a konfliktusok számát eredményesen szabályozza, az

elkülönítési minimum sérülések ritkán fordulnak elő, és mérsékelt számú ATC utasítással biztosítható a forgalom rendezett áramlása. A forgalom növekedésével azonban az utasítások száma arányosan emelkedik. Nagyobb forgalomnál ugyan még mindig képes kezelni a helyzetet, de a konfliktusok összetettebbé válnak, és az elkülönítési minimum sértések is megjelenhetnek, majd gyakorlatilag állandóvá válnak, jelezve, hogy a hatékonyság bizonyos szint felett csökken. Ez 3.2. pontban bemutatott konfliktusfeloldási algoritmus egyszerűsítéseire vezethető vissza, mivel keresztező konfliktusok esetében, ha a megnövekedett forgalom miatt nem lehetséges szintváltás, akkor újabb konfliktusok generálódhatnak a forgatással. Ez alapján az ágens főként alacsony és közepes forgalmi sűrűség mellett működik optimálisan, míg nagy terhelés esetén további fejlesztésekre – például magasabb szintű algoritmusokra – lehet szükség.

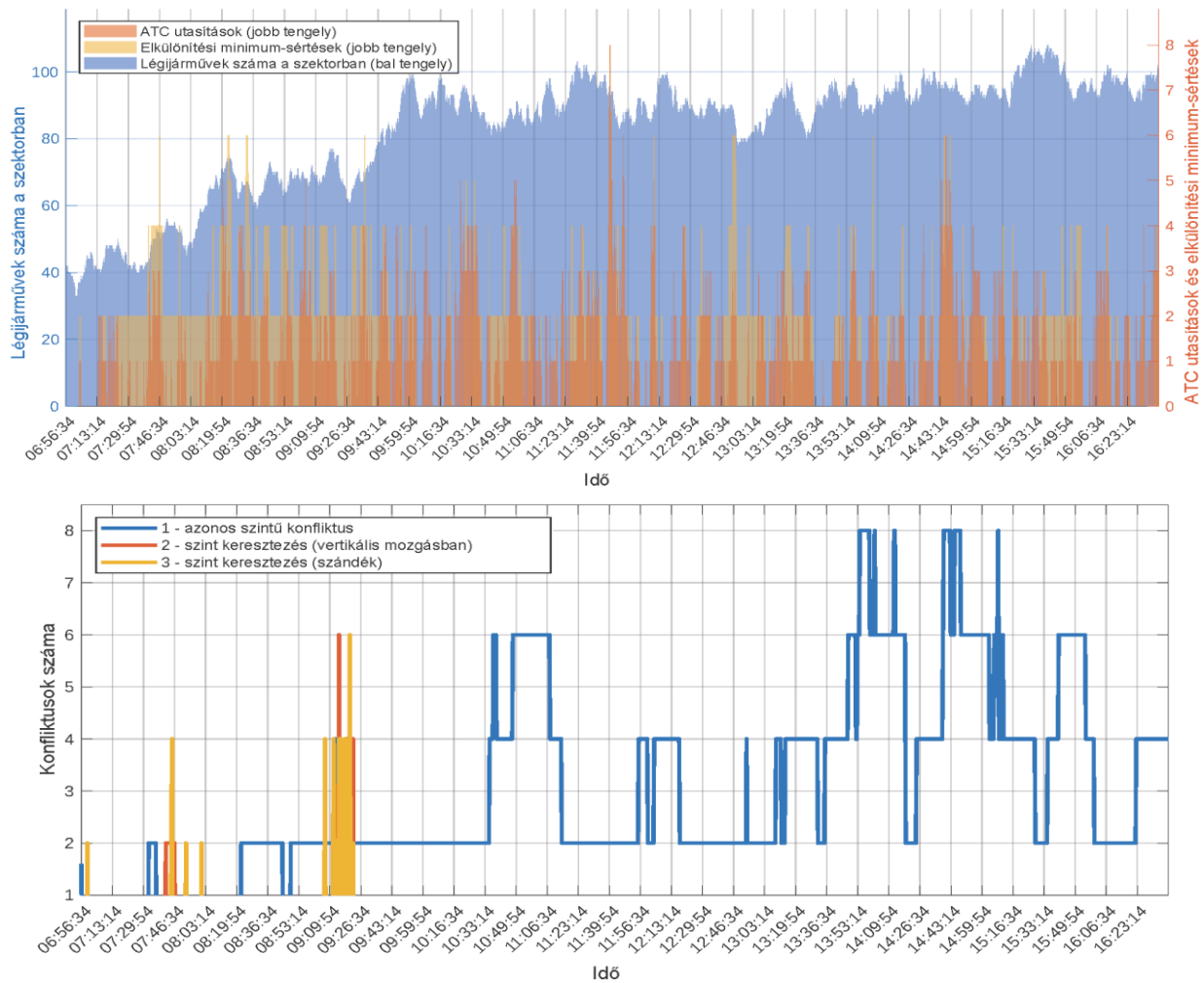
5. KONKLÚZIÓ

Az irányítói ágens a valós irányítás leképezésére irányuló limitációi a forgalomszimuláció limitációiból adódnak:

- A korlátozott légterek jelenleg nem szerepelnek a forgalomszimuláció adatbázisában, így nem vehető figyelembe az ezektől tartandó elkülönítési minimum okozta munkaterhelésnövekedés.
- A forgalomszimulációban nem szerepelnek az aktuális vagy archív időjárás adatok, így az időjárás miatti kerülések hatása csak a légi jármű ágens irányából érkező kérések gyakoriságának növelésén keresztül modellezhető.
- A forgalomszimuláció számára ismeretlenek a szomszédos szektorokkal megállapodott eljárások adatai, azaz nem képes kezelni az előre megegyezett ki- és belépési pontokat, illetve magasságokat, amelyekhez a forgalom igazítása a gyakorlatban munkaterhelés növekedéssel járhat.

Az irányítói ágens ezen kialakítása egy irányítói páros munkavégzését modellezi. Létrehozható egy olyan SV funkcionalitás, amely az adott indukáló tényező fellépésekor – például az irányítói ágens hatékonysági mutatóinak adott küszöbértéket való elérése – szektorizálhat, és külön irányítói ágenseket hívhat meg minden szektorba, ezzel az SV funkcionalitást modellezve.

Mivel a 3.2 pontban példaként kidolgozott algoritmus nem tartalmaz olyan komponenst, amely a forgalomtól függően változtatna a paramétereken (pl. megnövekedett konfliktusfeloldási idő), így a hierarchikus struktúrában ugyanezt az ágens többször meghívva az eredmény nem módosulna. Az algoritmus továbbfejlesztése során cél azon paraméterek valamint értékkészletük azonosítása, amelyek módosításával a forgalomfüggés leképezhető. Jelen vizsgálat a struktúra használhatóságának bemutatására irányult egy példa irányítói algoritmussal, amely a meglévő szimulációs környezetbe illeszkedően hierarchikus felépítéssel biztosítja a valós irányítási környezet modellezését.



6. ábra. A forgalomnagyság, ATC utasítások és elkülönítési minimum sértések (felül) valamint a konfliktusok típusai (alul) a szimuláció során

HIVATKOZÁSOK

- Flynn, G., A. Benkouar and R. Christien (2003). Pessimistic Sector Capacity Estimation. *EEC Note*, **21**, 1–10. EUROCONTROL Experimental Centre, Brétigny-sur-Orge, France.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (2018). Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation: Air Traffic Services, 15th Edition. ICAO, Montreal.
- Jáger, R. A., G. Szabó (2023). Légiforgalmi irányítás megvalósítása ember-gép feladatmegosztáson alapuló biztonsági architektúrával. In: *XVII. IFFK 2023: Innováció és fenntartható felszíni közlekedés* (Péter, Tamás (szerk.)), Paper 16. 7 p. Magyar Mérnökakadémia (MMA), Budapest.
- Jáger, R. A., G. Szabó (2025). Air Traffic Simulation Framework for Testing Automated Air Traffic Control Solutions. *Applied Sciences*, **15**(12), Article 6414. <https://doi.org/10.3390/app15126414>
- Kale, U., I. Jankovics, J. Rohacs and D. Rohacs (2018). Load monitoring for operators' load management. In: *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018)*.
- Ribeiro, M., J. Ellerbroek and J. Hoekstra (2020). Review of Conflict Resolution Methods for Manned and Unmanned Aviation. *Aerospace*, **7**(6), Article 79. <https://doi.org/10.3390/aerospace7060079>
- Számel, B., I. Mudra and G. Szabó (2015). Applying airspace capacity estimation models to the airspace of Hungary. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, **43**(3), 120–128. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7512>
- Wang, Z., W. Pan, H. Li, X. Wang and Q. Zuo (2022). Review of Deep Reinforcement Learning Approaches for Conflict Resolution in Air Traffic Control. *Aerospace*, **9**(6), Article 294. <https://doi.org/10.3390/aerospace9060294>