On-line jármű pozíció-információkon alapuló forgalom előrejelzés szimulációs, validációs és irányítói erőforrás-allokációs céllal

Jáger Rebeka Anna*. Dr. 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: A közlekedés dinamikus rendszerében a modern technológiai elemeknek köszönhetően ma már számos közlekedési alágazatban lehetőség van a járművek valós idejű, on-line pozícióadatainak továbbítására. Ezek bárki számára hozzáférhető formában állhatnak elő, így megalapozva szimuláció készítésekor annak érvényességét valós folyamatok leírására. A légiforgalmi irányításban tapasztalható automatizálási tendenciák nyomán szükségessé válik egy olyan tesztkörnyezet kialakítása, amelyben szimulálható egy automatizmus működése, nem csak például a konfliktus feloldó algoritmus tekintetében, hanem akár ember-gép munkamegosztás területén is. Valós forgalmi adatok archív formában könnyen beszerezhetők, azonban ez a közlekedési rendszer jelenlegi működését rögzíti, a már lezajlott irányítási folyamat eredményeképpen, így egy automatizálás megbízható teszteléséhez szükségessé válik a valós adatokon alapuló forgalmi igény előállítása becsléssel.

1. BEVEZETÉS

A közlekedésirányítás hatékonyságának és biztonságának növelésére szolgálhat, ha a járművek pozícióadatai on-line, valós időben állnak rendelkezésre a feladathoz. Ez kiegészítést szolgáltathat például a Péter *et al.* által végzett, városi forgalom trajektória alapú optimalizálásához (Péter *et al.*, 2022). Hasonlóan, a Péter *et al.*, által vázolt Adatbank funkcionalitásához, amelyet városi levegő és zajszennyezés problémájának vizsgálatához állít fel (Péter *et al.*, 2021). Szimuláció készítésekor valós adatok használata megkönnyítheti a szimuláció érvényességének demonstrálását. A szimulációk sokrétűségét mutatja, hogy Bóna *et al.*, a városi logisztika területén használta sztochasztikus rendszerek leírására (Bóna *et al.*, 2020).

A légiforgalmi irányítás folyamatának szervezését a stratégiai fázisban nagyban megkönnyítheti, ha rendelkezésre állnak információk a nem túl távoli jövőben fennálló légiforgalmi helyzetről. Ez alapja lehet a szektorizáció szervezésének a szektorok terheltségének előre becslésével, és akár az optimális szektorkonfiguráció előrejelzésével.

A légiforgalmi irányítás automatizálási törekvéseivel egyidejűleg szükségessé válik egy olyan tesztkörnyezet létrehozása, amely univerzálisan használható

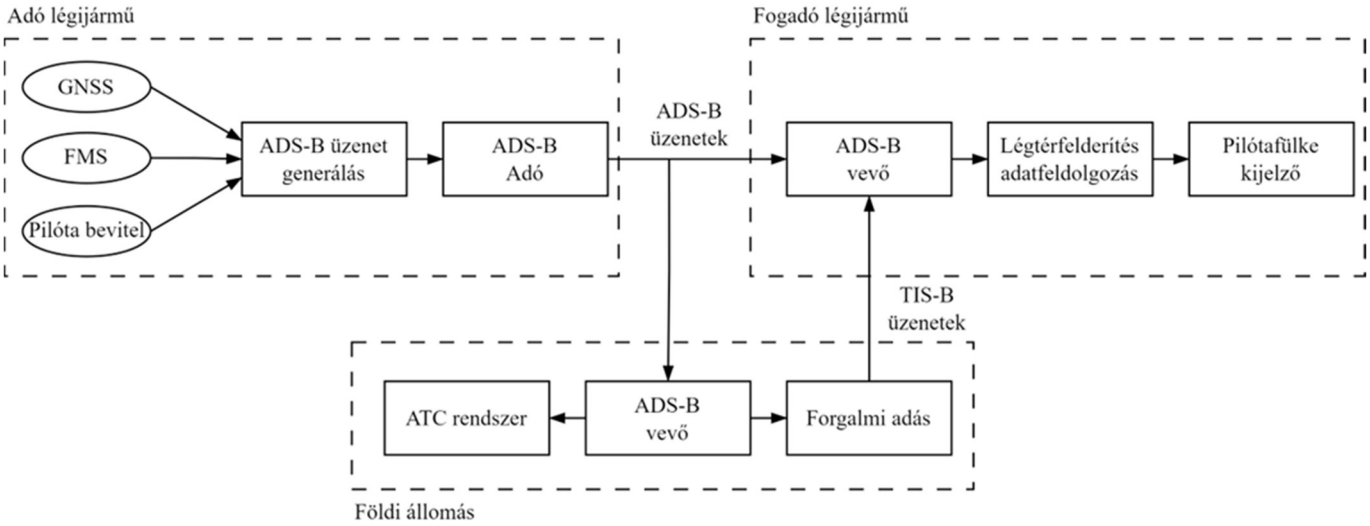
- a konfliktus feloldási algoritmusok,
- az irányítási struktúra,
- ember-gép munkamegosztási modell

teszteléséhez.

A validáció érvényességéhez szükséges, hogy a használt adatok valós adatok legyenek, így a valós forgalmon való működés modellezhetővé válik. Könnyen beszerezhetők historikus radaradatok, amelyek a múltbéli forgalmat reprezentálják, azonban ezek nem alkalmasak új irányítási funkciók vizsgálatára, mivel ezeket a már meglévő irányítás kezelte, az ilyen archív adatok a leirányított forgalmat mutatják, nem tartamaznak (feloldandó) konfliktust.

A légiforgalmi irányítás új eszköze az ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast). Ez egy redundáns légtér felderítési mód, amely használata a legtöbb légijárművön 2017 óta kötelező az Európai Unióban (European Union, 2011). A fedélzeten elhelyezett jeladó a légijármű néhány kulcsfontosságú paraméterét (pl. hívójel, ICAO 24 bites azonosító, magasság, sebesség, irány stb.) lesugározza, amelyet a földön elhelyezet vevők észlelnek. A rendszer funkcionális blokkdiagramja az 1. ábrán látható. Példaképpen a HungaroControl Igló utcai székházán elhelyezett vevő fedésterülete látható a 2. ábrán.

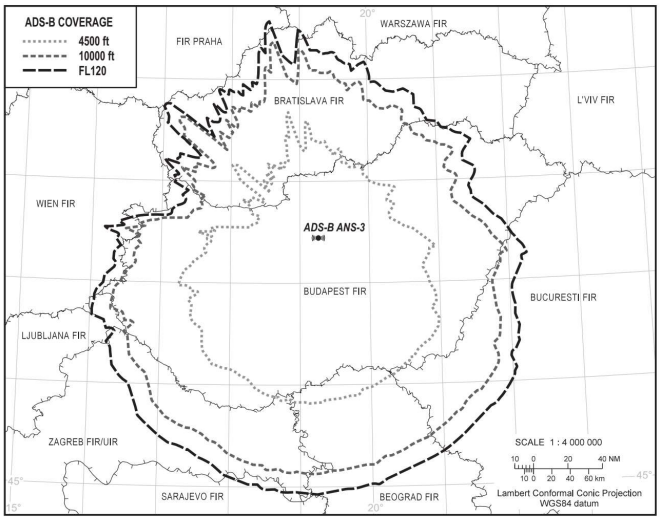
Ezek alapján látható, hogy már egy ADS-B vevő is relatív nagy terület lefedésére képes. Ezek az adatok könnyen hozzáférhetők, bárki építhet házilag is ilyen vevőkészüléket (például Raspberry Pi alkalmazásával, amelyhez egyes fórumokon kész forráskód is található). Az ilyen, amatőrök által gyűjtött adatok hálózatba kapcsolásával számos weboldal foglalkozik, melyek API-t (Application Programming Interface) is biztosítanak az adatokhoz. Így kézenfekvő a tesztkörnyezet kiinduló adataiként ADS-B adatokat használni, amelyek ANSP-k (Air Navigation Service



1. ábra. Az ADS-B rendszer komponenseinek blokkdiagramja (Baek *et al*., 2012)

Provider) számára is könnyen elérhetők a saját adataikként, ANSP-n kívüliek számára pedig nyílt adatokként.

Mivel ilyen könnyen elérhető adatforrásról van szó, így számos tanulmány hasznosította. Például Baek *et al.* trajektória becslésen alapuló konfliktus detektáló algoritmust készített *(*Baek *et al.,* 2012*)*. Shultz *et al*. az A-CDM (Airport Collaboration Decision Making) rendszerben a trajektóriák klaszterezésével becsülte elő a fékoldási időt (Shultz *et al*., 2020). A másik oldalról, a légijármű teljesítményének becsléséhez is használható, mint ahogy Sun *et al*. különböző repülőgép típus szerint modelleket állított fel a különböző repülési paraméterek becslésére a repülés egyes szakaszainak megfelelően (Sun *et al*., 2017).



2. ábra. A HungaroControl székházán elhelyezett ADS-B vevőkészülék fedési területe (HungaroControl, 2023)

2. A MEGVALÓSÍTÁS ELVE

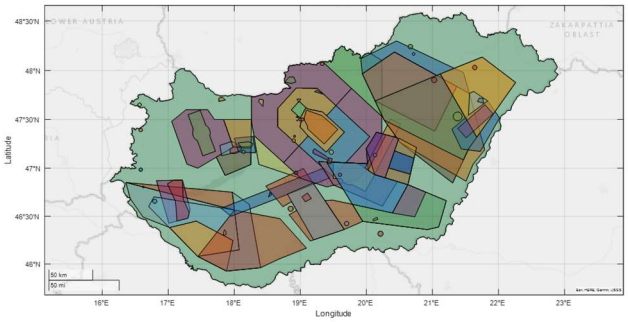
A kitűzött célok egyszerű megvalósításához kézenfekvő lenne az ADS-B adatok és a repülési terv adatok kombinálása. Bár a repülési terv adatok kétségkívül rendelkezésre állnak egy ANSP számára, de a nyilvánosság számára nehezen érhetők el, kifejezetten valós időben és ingyenesen vagy alacsony költség mellett. Így a megvalósítás során kizárólag ADS-B adatok kerültek használatra. Ennek beszerzésére számos szerver biztosít API-t, mellyel lekérdezhetők a kívánt adatok akár ingyenes formában vagy alacsony feliratkozási költséggel. Az API használatára a legtöbb programozási környezetben beépítetten van lehetőség, így például Python vagy Java is használható, a továbbiakban a Matlab környezet került kiválasztásra.

A Matlab beépített függvények kezelésével képes az API használatára, például a *webread* függvény alkalmas API olvasására. A válasz .json formátumban áll rendelkezésre, melyet a Matlab automatikusan felismer és struktúra objektummá alakít, így a további feldolgozás elvégezhető rajta. A válasz fájlban lévő adatokat könnyen meg lehet jeleníteni, mivel az ADS-B adatok WGS-84 koordinátákat (World Geodetic System) tartalmaznak, amelyet a Matlab beépített függvénye, a geoscatter képes térképre helyezni, de szélesebb körű megjelentési opciók állnak rendelkezésre a Mapping Toolbox beszerzésével, amely a továbbiakban használatra került.

A pozíció adatok értelmezéséhez szükségesek a légterek vagy a kiválasztott terület földrajzi adatai, amely alapján szűrés végezhető. Ha az országhatár használata (amely nem feltétlenül mutat tökéletes egyezést az adott ország légterével) elegendő, akkor valamilyen külső forrásból letöltött vagy API-on keresztül lekérdezett .shp fájl használható területi alapú szűréshez (pl. az *inpolygon* függvénnyel). Légtér információk használatakor a nyilvánosan elérhető openair formátumú légtér fájlok konvertálása a Matlab által kezelt formátumba (pl.

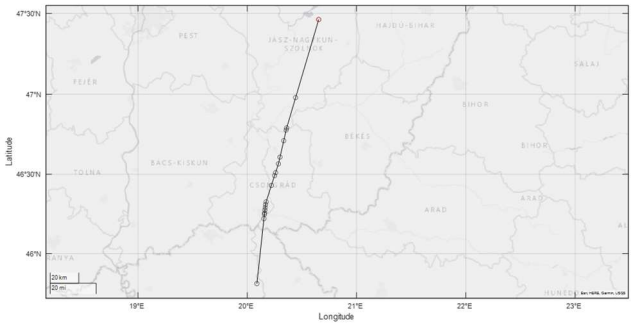
.geojson) jó megoldást jelent, mert így indexelhetővé válnak az egyes elemek. Példa a 3. ábrán a magyarországi légterek.

Az Open Sky Network által üzemeltetett API biztosít lehetőséget WGS-84 koordináták megadásával adott területre való szűrésre; az itt tartózkodó légijárművektől származó ADS-B információkat adja válaszként (Schäfer *et al*., 2014).



3. ábra. Magyarország légterei openair formátumból geojson formátumba konvertálva

Ez a szerver kísérleti jelleggel tartalmaz olyan funkciót, amelyben lekérdezhető a légijármű track-je. Ezt 15 percenként, illetve különböző paraméterek előre definiált mértékű változásaikor (pl. heading, magasság stb.) rögzített pontokkal (waypoints) írja le. Erre példa a 4. ábrán látható, ahol egy légijármű múltbéli útvonalának pontjai feketével, az aktuális hely pirossal jelölve jelenik meg. Azonban a tapasztalat szerint ez a funkció még nem működik megfelelően stabilan a további felhasználáshoz. Hasonló információ állítható elő a legegyszerűbb, aktuális állapotot tartalmazó lekérdezés futtatásával bizonyos *dt* időközökként.



4. ábra. Az API-ból beolvasott track adatok vizualizációja

Így az API által biztosított adatokról készíthető egy egyszerű vizuális megjelenítés, amely az ellenőrzést szolgálhatja a továbbiakban.

Az 5. ábrán látható példában legyen a vizsgált légtér Magyarország magaslégtere (kék), az API által küldött légijárművek a repülési magasság függvényében színskálával jelölve, az emelkedő légijárművek kék, a süllyedő légijárművek piros x-szel jelölve, és a haladási irányuk a sebességgel arányos hosszúságú kék szaggatott vonalú vektorral ábrázolva.

2.1 Jövőbeli igények

A szimuláció egyik célja egy, a *t* idő múlva jelentkező igényhalmaz előállítása automatizálás teszteléséhez. A vizsgált irányítási szektort (jelen esetben Magyarország magaslégterét) vizsgálva megállapítható, hogy a szektorban tartózkodó légijárművek már a szektor irányítása alatt állnak, azaz az irányítók éppen gondoskodnak arról, hogy köztük ne legyen konfliktus. Így a vizsgált szektorban tartózkodó légijárműveket kiszűrve, csak azok kerültek ábrázolásra, amelyek még nem léptek be a szektorba (6. ábra).

A 6. ábrán a légijárművek vektorját vizsgálva látható, hogy előáll egy igényhalmaz, akik *t* idő múlva a légtérbe fognak lépni. Nem túl nagy időközök esetében (10-20 perc) kellően pontos becslést ad a légijárművek jelenlegi sebességének és irányának használatával előállítani, hogy hol lesznek egy adott *t* idő múlva. A példában *t = 10 min* -t választva mutatja a becsült forgalmi helyzetet a 7. ábra.

A 7. ábrán fekete szaggatott vonallal a jövőbeli becsült útvonal jelenik meg, a jövőbeli becsült helyzet mögött. Így előáll egy igényhalmaz az adott szektorra *t* idő múlva, a következő feltételezések mellett:

- a légijárművek az aktuális irányukat hozzávetőlegesen tartani fogják, a Free Route Airspace miatt feltételezhetően az általuk kiválasztott, kedvezőnek ítélt irányon repülnek, és ezt tartani szándékoznak,
- az emelkedési/süllyedési manővereket csak egy adott feltételhez köthetően folytatják, például a következő repülési szint eléréséig.

A becslés finomítható:

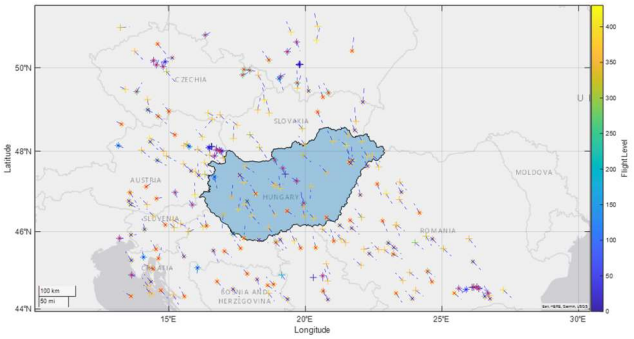
- az időjárási jelenségek figyelembevételével, kerülők becslésével,
- az olyan terület specifikus tulajdonságok figyelembevételével, mint pl. az ukrajnai légtérzár, így a forgalom alternatív útvonalának becslése,
- az országhatár közelében lévő repülőterek érkező forgalmának figyelembevételével, a használt t időablak függvényében a repülési magasság szerint becsülhető, hogy mely légijárművek fognak ide leszállni, ezzel nem érintve az adott szektor légterét,
- az országhatár közelében lévő repülőterek induló forgalmának figyelembevételével, amelyek a vizsgált légtérbe lépve akár még emelkedési eljárást folytathatnak.

Az igényhalmaz tulajdonságai az eredeti ADS-B adatokkal egyező struktúrában állnak elő, ahol egyes paraméterek változatlannak tekintettek (pl. irány) és egyes paraméterek feltételesen módosultak (pl. koordináták a sebesség és irány függvényében, repülési szint az emelkedés függvényében).

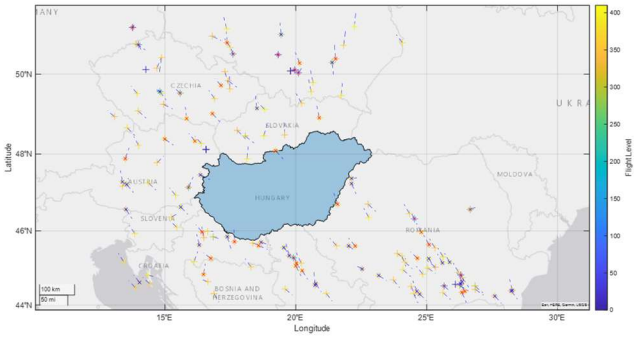
2.2 Jövőbeli forgalmi terheltség

A szimuláció másik célja egy kiválasztott légtér vagy szektor *t* idő múlva fellépő forgalmi terheltségének becslése. Ehhez a szektor, a légijármű sebessége és *t* idő nagyságának függvényében nem jelenthető ki egyértelműen, hogy az adott

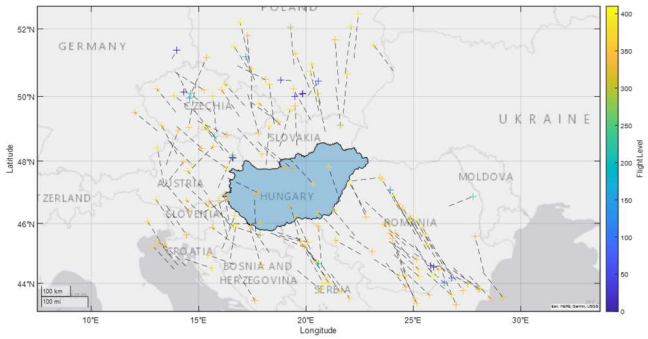
szektor jelenlegi forgalma elvethető. A példában Magyarország magaslégterét észak-déli irányban 30 perc alatt könnyen keresztezi egy átlagos útvonal repülés, azonban a repülőterekről felszállók és keleti vagy nyugati irányba indulók sebességük függvényében még a légtérben tartózkodhatnak.



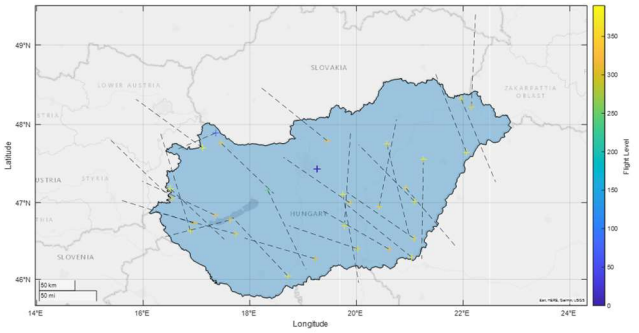
5. ábra. Az ADS-B adatok megjelenítése



6. ábra. A megfigyelt terület kiszűrésével keletkező forgalom



7. ábra. Becsült forgalmi szituáció 10 perc múlva



8. ábra. A légijárművek becsült útvonala a megfigyelt területen

A 8. ábrán bemutatott példa a $t = 10\ min$ múlva a magyar légtérben lévő légijárművek, ahol a fekete szaggatott vonal a következő 10 perc alatt megtenni becsült útvonalat mutatja. Az eljárás megfontolásai és a becslés finomítási lehetőségei megegyeznek a 7. ábránál bemutatottakkal. Az így keletkezett adatok az előzőkhez hasonlóan az ADS-B adatokkal megegyező struktúrában állnak elő.

3. ELLENŐRZÉS

A modellben a vizsgált t idő múlva az ADS-B adatokat ismételten beolvasva meghatározható a becslés hibája. Ilyenkor a t idő megválasztásakor szempontként jelenik meg az ADS-B adatok frissülési ideje, amely az itt használt API esetében 15 másodperc, így érdemes legalább kb. 2 perces időtávú előre becslést vizsgálni, hogy a frissítési idő ne jelentsen túl nagy hibát. A példában a 9. ábra 5 perc elteltével ábrázolja a számított és az ismételten beolvasott adatokat, ahol párba állíthatók (az ICAO 24 bites transzponder azonosító alapján) kék szaggatott vonallal jelölve a valós elmozdulás, a végén a magasság szerint színezett valós pozícióval és fekete szaggatott vonallal és jelölővel a számított elmozdulás, illetve pozíció.

Az ábra alapján a becslési hibát okozó tényezők összegezhetők:

- a repülőterek környékén a megközelítési és emelkedési eljárások nem extrapolálhatók egyértelműen,
- a $t = 0$ min és $t = 2$ min időben beolvasott adatok között nem feltétlenül áll fent kölcsönösen egyértelmű hozzárendelés; a beolvasás határán, illetve a repülőtereken a dt időköz alatt ki- és beléphetnek a légijárművek a halmazba.

Megoldást jelenthet a modell olyan módú használata, melyben a magaslégtér a TMA (Terminal Movement Area) légtértől elkülönítve kerül vizsgálatra, pl. a magasság alapján 9000' feletti légijárművek kiválasztásával. További fejlesztési irányként a becslés kiterjeszthető a TMA légtérre is, a repülőterek aktuális eljárásai alapján, ahol akár az egyéb korlátozások (pl. napszak, időjárás) is figyelembe vehetők.

A becslés relatív hibájának vizsgálatához érdemes a földön álló repülőgépeket kiszűrni, mivel ezek jövőbeli helyzetének becslése túlzott pontossággal torzítja a relatív hibát. Példaképpen az 1. táblázatban a repülőterekkel együtt számított pozíciók mellett látható a relatív hiba (ahol párosítható hozzá beolvasott adat) $t = 5\ min$ idő múlva.

A relatív hiba számításakor:

- légijárművenként a szélességi és hosszúsági koordináták relatív hibájának átlaga,

- a teljes adathalmazra az összes légijármű relatív hibájának átlaga (ahol található hozzá *t* idővel későbbi adatpont).

A példában a földön álló légijárművek kizárása nélkül a teljes adathalmaz relatív hibája 0,0051, a földön állók nélkül 0,006.

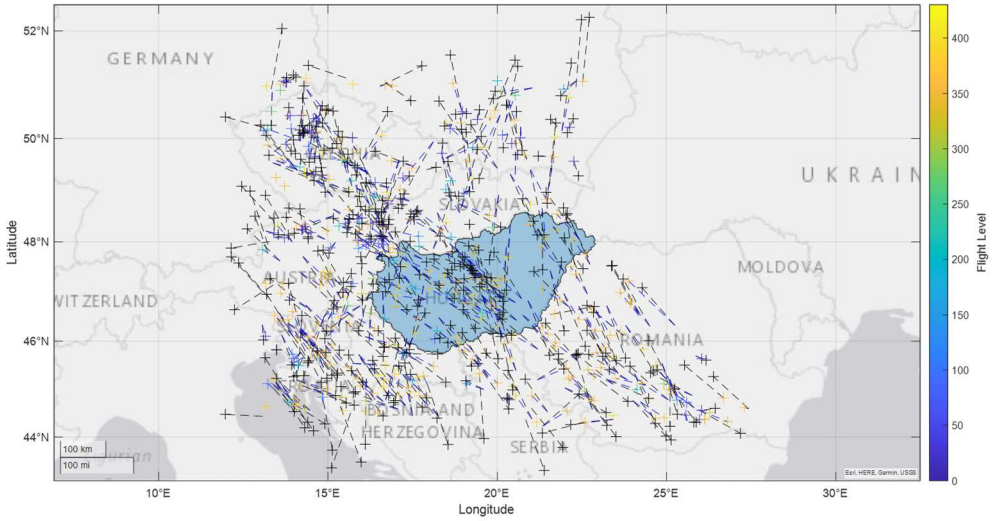
A módszer pontosságának vizsgálata az 1. táblázat szerinti időközökben értelmezett eredményekkel történt. A teszteléskor használt időközök megválasztásakor szempont, hogy a program futási idejénél magasabb legyen a két beolvasás közötti idő, hogy a feldolgozás mindenképpen befejeződjön.

Ebben az esetben a becslés mindig a kiinduló, *t = 0 min* pillanatú adatot használta és hasonlította össze a táblázatban szereplő t időnként visszaolvasott értékkel. A gyakorlatban érdemesebb visszaolvasáskor a becslés alapját képző adathalmazt az új adathalmaznak választani, mivel rövidebb időhorizonton pontosabb eredmények várhatók, a pontosság változásának szemléltetése okán történt így a tesztelés.

Az eredmények pontosításának lehetséges módjai:

- a repülési magasság és a manőverezés vizsgálata, ezzel a repülőterek megközelítését végző esetek felismerése, becsült idő társítása és az időablaknak megfelelően a jármű levonása,
- az időjárási jelenségek figyelembevétele, kerülési lehetőségek becslése,
- a repülőterek érkező és induló forgalmának figyelembevétele.

A táblázatban szereplő hiba értékek kizárólag horizontális dimenzióban értelmezettek, a repülési magasság becslésének pontosságát nem tartalmazzák.



9. ábra. A számított és valós adatok pozíciók eltérése

1. táblázat. Eredmények

Teszt időpontja: 2023. 06. 25. 15:04 Légtér: Magyarország					
Idő	Pozíció relatív hibája		Adott szektorban tartózkodók száma		
	Földön állókkal	Földön állók nélkül	Becsült	Tényleges	Relatív hiba
t = 5 min	0,00801	0,00814	52	58	0,103
t = 10 min	0,0139	0,014	60	65	0,0769
t = 15 min	0,0186	0,0185	65	65	0
t = 20 min	0,0212	0,0208	65	61	0,0656
t = 25 min	0,0318	0,031	54	61	0,115
t = 30 min	0,0373	0,0367	48	58	0,172

4. TOVÁBBI FEJLESZTÉSI IRÁNYOK

A használt API jelenleg kísérleti funkcióként tartalmazza a track-ek lekérdezési lehetőségét. Amennyiben később ez támogatott funkcióként jelenik meg, akkor felhasználhatóvá válik a járművek pályájának pontosabb becsléséhez. Ehelyett most a modell hosszabb időn keresztüli futtatása jelenthet megoldást.

A modell dinamikus használatával az adott *t* időablakot magasabbra választva, a futás során újra lekérdezendő eredmények használatával finomított becslés kellően pontos eredményeket produkálhat ahhoz, hogy a kérdéses terület ne egy ország légtere legyen, hanem ennél kisebb területek, akár szektorok terheltsége. Ez alapján a program javasolhat olyan optimális szektorkonfigurációt, amellyel a szektorokhoz előre beállított értékek a lehető legkedvezőbben alakulnak. Így könnyen lehetőség nyílna a szektorkonfiguráció meghatározásakor nem csak a durva adatnak tekinthető gépszám használatára, hanem más mutatók bevonására (pl. időjárási viszonyok, emelkedő/süllyedő gépek száma stb.).

Külön kezelhetőek a vizsgált területen belüli TMA (és akár MTMA) légterek, az itteni eljárásokat ismerve csökkenthető a repülőterek környékén jelentkező relatív hiba, akár külön becslés adható az ilyen légterek forgalmára, ahol figyelembe vehetők egyéb eljárásbéli sajátosságok (pl. éjszakai eljárások).

Az országhatárhoz közeli repülőterek forgalmának figyelembevétele nagyban pontosíthatja a becslést, a használt időablakra tekintettel. A magyarországi példa esetében fél órás időablak használatánál már releváns a közeli bécsi repülőtér érkező járatainak elkülönítése. Ezen adatokat kézenfekvő lenne a repülőtéri adatbázisokból lekérdezni, vagy repülési terv adatokat használni, de ADS-B adatok megfigyelésével is felismerhetőek az ilyen mintázatok – pl. az adatok ismételt lekérdezésével az ereszkedés észrevétele és korrelálása a repülőtér helyzetével.

A másik célkitűzésként megjelenő, automatizált rendszer teszteléséhez való környezet biztosításához kellően pontos adatnak tekinthetők még a nagyobb relatív hibával rendelkező időhorizontú becslések is, mivel valós forgalmi adatokon alapulnak, a valós forgalmi igényeket mutatják; és mivel az aktuális forgalomból előre becsléssel képződtek, így nem irányított forgalmat tartalmaznak, semmi sem biztosítja, hogy az adott légtérben ne legyen benne konfliktus.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk első szerzőjének kutatómunkáját az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-23-2-I) Felsőoktatási Mesterképzés Hallgatói Kutatói ösztöndíjjal támogatta, azonosító: ÚNKP-23-2-I-BME-183.

HIVATKOZÁSOK

Baek, K. és H. Bang (2012). ADS-B based Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Management. *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.* **13**(3), 377–385

Bóna, K. és D. L. Sárdi (2020). Sztochasztikus folyamatok kezelése a városi koncentrált igénypont-halmazok szimulációs modellezésében. Péter, Tamás (szerk.) *XV. IFFK 2020: Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés.* Paper 18.

European Union (2011). European Comission, Commission Implementing Regulation (EU) No 1207/2011 of 22 November 2011 laying down requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the single European sky.

HungaroControl (2023). AIRAC AMDT 002/2023. AIP.

Péter, T., A. Háry, F. Szauter, T. Vadvári és I. Lakatos (2021). Makroszkopikus forgalmi modell bázisú analízis és adatbank szerepe, a levegő és zajszennyezés csökkentésére. Péter, Tamás (szerk.) *XV. IFFK 2021: Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés.* Paper 29.

Péter, T., A. Háry, F. Szauter, T. Vadvári és I. Lakatos (2022). Közúti hálózati modell alkalmazása a környezeti terhelések optimálására. Péter, Tamás (szerk.) *XVI. Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia (IFFK 2022)* Paper 18.

Schäfer, M., M. Strohmeier, V. Lenders, I. Martinovic és M. Wilhelm (2014). Bringing Up OpenSky: A Large-scale ADS-B Sensor Network for Research. *Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 83-94.

Shultz, M., J. Rosenow és X. Olive (2020). A-CDM Lite: Situation Awareness and Decision-making for Small Airports based on ADS-B Data. *9th SESAR Innovation Days: Inspiring Long-Term Research in the Field of Air Traffic Management*, SIDs 2019, Dec 2019, Athènes, Greece. ffhal-02623883f

Sun, J., J. Ellerbroek és J. Hoekstra (2017). Modeling aircraft performance parameters with open ADS-B data. *12th Seminar Papers: 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*