

Számel Bence Domonkos, Szabó Géza

FORGALOM-ELŐREJELZŐ MODUL FEJLESZTÉSE SEKTORKONFIGURÁCIÓ TERVEZŐ DÖNTÉSTÁMOGATÓ ESZKÖZHÖZ

A légiforgalmi irányítási rendszerekben az irányítói munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfigurációval kapcsolatos döntéseket a supervisorok meghatározott szabályrendszer alapján, de azon belül elsősorban saját tapasztalataikra és képességeikre hagyatkozva hozzák meg. Biztonsági és hatékonysági megfontolások is indokolnák, hogy ezen döntési folyamatot automatizált eszközzel támogassuk, amely képes javaslatot tenni az optimális szektorkonfigurációra. Egy ilyen eszköznek szimulálnia kell az "ideális" supervisor döntési folyamatának minden lépését, köztük a közeljövőben várható légiforgalmi helyzet előrejelzését. Ebben a munkában áttekintjük egy döntéstámogató eszköz funkcionális modelljét és bemutatjuk, milyen funkciókat kell az eszköz forgalom előrejelző moduljának megvalósítania és milyen algoritmusok alapján történhet mindez. Ennek során a légi jármű pozíciók egyszerű előrevetítése mellett figyelembe vesszük a korlátozott légtértartományok kerülését és az esetleges irányítói beavatkozást szimuláló funkciók szükségességét is.

Kulcsszavak: légiforgalmi irányítás, döntéstámogatás, forgalom előrejelzés, szimuláció, konfliktus feloldás

1. BEVEZETÉS

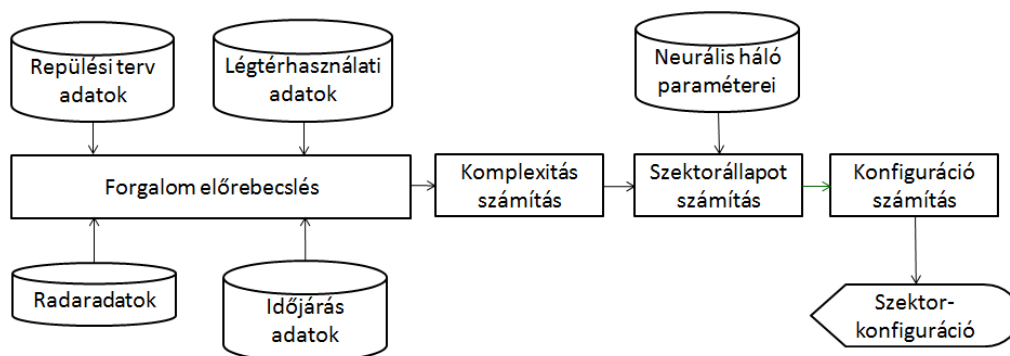
A légiforgalmi irányítási rendszerrel szemben alapvető elvárás, hogy a lehető legnagyobb mértékben járuljon hozzá a kereskedelmi légi forgalom biztonságához. Ahhoz, hogy ennek az elvárásnak eleget tegyen, a rendszernek biztosítania kell, hogy minimális legyen a bekövetkezési valószínűsége a légiforgalmi irányítók hibáinak, amelyek közvetlenül vagy közvetetten biztonsági veszélyeztetések (pl. elkülönítési minimum sérülése) vagy balesetek kialakulásához vezethetnek. A biztonságkritikus rendszereket kezelő operátorok, így a légiforgalmi irányítók teljesítményét is (ami magában foglalja a hibázás valószínűségét is) számos viselkedést befolyásoló tényező alakítja [1], amelyek között megtalálható a munkaterhelés is [2]. Egy irányító munkaterhelését nagymértékben befolyásolja az, hogy a felelősége alá tartozó légiforgalmi irányítási szektorban hány légi jármű tartózkodik és hogy a kezelendő forgalmi szituáció mennyire komplex, azaz mennyire igényel az irányítása fokozott figyelmet és összetett döntéseket az irányítótól. Egyes kutatások (pl. [3], [4]) alapján feltételezhetjük, hogy ha a komplexitást különböző számszerű tényezők segítségével le tudjuk írni, akkor ezen tényezők értékei alapján a megfelelő függvények használatával lehetséges becslést adni a munkaterhelésre, amit egy adott szektorban egy adott forgalmi szituáció elő fog idézni. Más szóval ezen számítások segítségével megállapítható, hogy szükség van-e az adott szektor további szektorokra történő bontására vagy összevonására más szektorral.

A szektorok osztásával vagy összevonásával (azaz az aktuális szektorkonfiguráció megváltoztatásával) kapcsolatos döntéseket a légiforgalmi irányítók munkáját koordináló supervisor feladata meghozni. Napjaink légiforgalmi irányítási rendszereiben a döntést a supervisor saját problémamegoldó képessége és tapasztalata alapján hozza meg úgy, hogy csak minimális funkcionalitású (például csak a szektorokban tartózkodó légi járművek számát figyelembe vevő) sza-

bályrendszer vagy automatizált segédeszköz áll a rendelkezésére. Emiatt előfordulhat – különösen a megszokottól eltérő forgalmi szituációk jelenlétében – hogy a supervisor nem a munkaterhelés (és ezáltal a biztonság) szempontjából optimális döntést hozza vagy éppen ennek ellenkezőjét teszi, azaz túl nagy mértékben téved a döntés során a biztonság irányába és több irányítót rendel a forgalom kezelésére, mint amennyi minimálisan szükséges lenne, ezzel csökkentve a rendszer hatékonyságát. Ezen problémák elkerülése érdekében érdemes lenne olyan automatizált döntéstámogató eszközt létrehozni, amely a forgalmi szituációk komplexitása alapján kiszámítja az egyes szektorokban várható munkaterhelést és javaslatot tesz a supervisoroknak a különböző szektorok állapotára, azaz a szektorkonfigurációra.

A felvázolt eszköznek működése során a supervisor gondolkodásmódját kell tükröznie. Emiatt figyelembe kell venni egyebek mellett, hogy a szektorkonfiguráció bármilyen jellegű változtatása előtt szükség van bizonyos időre (jellemzően 10–20 percre), hogy az érintett irányítók megismerhessék az új szektorok forgalmát, az újonnan beosztott irányítók pedig elfoglalhassák munkaállomásukat. Ennek megfelelően a szektorkonfigurációt a supervisor nem az adott pillanatban fennálló, hanem a 10–20 perccel később várható forgalmi szituációra vonatkozóan határozza meg. Más szóval a szektorkonfiguráció előállításának első lépése egyfajta előrejelzés készítése a forgalomra vonatkozóan az aktuális forgalmi helyzet alapján a szektorkonfiguráció változtatása szempontjából releváns időpontra, vagyis a döntéstámogató eszköz egyik moduljának a forgalom előrebecslésével kell foglalkoznia. Cikkünkben ennek a forgalom előrejelző modulnak a működését mutatjuk be.

2. A FORGALOM ELŐREJELZŐ MODUL RENDELTETÉSE



1. ábra A munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfiguráció becslésére szolgáló automatizált eszköz felépítése

Az 1. ábra olyan automatizált döntéstámogató eszköz felépítését szemlélteti, amely képes az aktuális légiforgalomra és a légtérre vonatkozó adatokból kiindulva becslést készíteni az irányítói munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfigurációra (az eszköz esetünkben ehhez neurális hálót használ). Az eszköz működésének alapját a supervisorok szektorkonfigurációval kapcsolatos döntéshozási folyamata képezi, amely a következő fő lépésekből áll:

- ➔ a forgalom előrebecslése a szektorkonfiguráció érvényességének időpontjára (a továbbiakban t_p) vonatkozóan;
- ➔ a forgalom komplexitásának becslése az egyes szektorokban;

- a munkaterhelés és ezzel szoros összefüggésben az optimális szektorállapot (osztott, összevont vagy önállóan használt) becslése az egyes szektorokra;
- az optimális szektorállapotokat megvalósító szektorkonfiguráció tervezése.

Ennek megfelelően az eszköz különböző, egymásra épülő moduljainak célja a felsorolt döntési lépéseket modellező funkciók végrehajtása. A lépések végrehajtása során a supervisor a műszaki rendszerektől érkező adatokra (pl. radar- és repülési terv adatok, légtérszerkezetre vonatkozó adatok), különféle eljárásokra (pl. konfliktus feloldására vagy zivatarkerülésre vonatkozó eljárások) és saját tudására (pl. milyen forgalmi jellemzők hatnak a munkaterhelésre és milyen mértékben) támaszkodik. A döntés megfelelő szimulációjának érdekében tehát az automatizált eszköz számára is elérhetővé kell tenni ezeket az információkat. Ennek megvalósítása részben azáltal történik, hogy biztosítjuk az eszköz számára a hozzáférést a radar-, repülési terv- és légtéradatokat tartalmazó adatbázishoz, részben pedig azzal, hogy a különböző modulok által használt algoritmusokat a megfelelő paraméterekkel, ezeket pedig a megfelelő értékekkel látjuk el. Utóbbi jelentheti többek között a komplexitási tényezőnek tekintett forgalmi jellemzők kiválasztását (a supervisor komplexitási tényezőkre vonatkozó preferenciáinak modellezése), a komplexitási tényezőkből szektorállapotokat előállító neurális háló tanítását (a komplexitás és munkaterhelés közti kapcsolat feltárásának modellezése) vagy a korlátozott légtértartományok- és konfliktusok kerülése miatti módosított útvonalak előállítására szolgáló módszer meghatározását (forgalom előrejelzésének modellezése).

Az eszköz működésének és rendeltetésének részletesebb bemutatása [5]-ben olvasható, az pedig az itt ismertetettek alapján is látható, hogy bár az eszköz logikájának középpontjában a komplexitás és a várható munkaterhelés számítása áll, ez nem hajtható végre a forgalom előrejelzésére szolgáló modul nélkül. Az előrejelző modul feladata a ténylegesen megvalósuló forgalmi helyzetek radar-, repülési terv- és légtér-korlátozási adataiból kiindulva, a különböző előírások és gyakorlati szokások alapján meghatározott paraméterértékeket felhasználva előállítani azt a forgalmi szituációt (vagyis szimulált radaradat-halmazt), amely a t_p időpillanatban várhatóan fenn fog állni, és amelyre elvégezhetőek a különféle komplexitási számítások. Annak részleteiről, hogy ez hogyan valósulhat meg, a következő fejezetekben lesz szó.

3. ELŐREJELZETT SZITUÁCIÓK ELŐÁLLÍTÁSA

Mivel a modul feladata a supervisor által végzett forgalmi helyzet előrejelzés szimulációja, ezért működésének tervezése során a supervisor döntési folyamatát érdemes alapul venni. Ez a döntési folyamat magában foglalja a légijárművek közeljövőben várható pozíciójának, sebességének és repülési szintjének megállapítását, valamint az így előállított feltételezett forgalmi szituáció validálását. Utóbbi annak vizsgálatát jelenti, hogy a feltételezett forgalmi helyzet megvalósulhat-e a légiforgalmi irányítás hibája nélkül, azaz nem tartalmaz-e elkülönítési minimum sérülést vagy konfliktusban lévő légijárműpárt.

3.1. Adatok

A modul számára azoknak az adatoknak kell rendelkezésre állniuk, amelyeket a supervisor is felhasználhat a felvázolt döntési folyamat során. Ezek az adatok az alábbi három adathalmaz valamelyikébe tartozhatnak:

1. radaradatok;
2. repülési terv adatok;
3. légtér korlátozási adatok.

A radaradatok a jármű aktuális földrajzi helyzetéről (x, y), sebességvektoráról (v_x, v_y) és repülési szintjéről (FL) adnak információt. Mivel a légi jármű jövőbeli viselkedésével kapcsolatban nem hordoznak információt, ezért a jármű várható tulajdonságainak becslésére csak korlátozottan (legfeljebb 1-2 perces időtávra vonatkozóan) lehet őket megbízhatóan használni. A radaradatok ugyanakkor rendelkeznek azzal az előnnyel, hogy minden légi járműhöz rendelkezésre állnak, amelyet a radar észlelt, így ezek alapján bármely légi járművel kapcsolatban elvégezhető a becslés.

A repülési terv adatok a légi jármű által tervezetten érintett útvonalpontok ($W_1..W_n$) földrajzi koordinátáit (x_{wi}, y_{wi}) tartalmazzák az adott pont elérésének várható időpontjával (t_{wi}), valamint az elérésekor érvényes sebességgel (v_{wi}) és repülési szinttel (FL $_{wi}$) együtt. A légi járművekkel kapcsolatban feltételezhető, hogy általános esetben – vagyis ha nem kapnak ezzel ellentétes utasítást az irányítástól – a repülési tervben megadott útvonalat követik. Ennek megfelelően a repülési terv adatok alapján lényegesen pontosabb becslés készíthető a járművek jövőben várható tulajdonságaira vonatkozóan. Ezek az adatok ugyanakkor csak azokhoz a légi járművekhez kapcsolódóan állnak rendelkezésre, amelyeket sikerült tervezett járatként azonosítani és ez alapján repülési tervet rendelni hozzájuk.

A légtér korlátozási adatok halmaza a légtér azon tartományaival kapcsolatban tartalmaz adatokat, amelyek a forgalom előrejelzése szempontjából releváns légi járművek által várhatóan nem lesznek használhatóak. A korlátozott légtértartományokra vonatkozó adatok leírják a tartomány földrajzi elhelyezkedését (vagyis a határát meghatározó pontok koordinátáit) és magassági kiterjedését (azaz az alsó és felső határához tartozó repülési szintet). Az adatok emellett arról is hordoznak információt, hogy tervezett korlátozásról (valamely szabványos TRA¹ használatáról) vagy időjárás miatti „korlátozásról”, azaz zivatartevékenység miatt használhatatlan légtértartományról van-e szó. Utóbbi információra azért van szükség, mert a korlátozott tartomány kerülésének folyamata, és ennek következtében annak szimulációja a kétféle esetben különböző módon mehet végbe.

3.2. Forgalom becslése korlátozások nélkül

A supervisor az előző alfejezetben bemutatott adatokat használhatja fel a közeljövőben várható forgalomra vonatkozó mentális kép megalkotásához. Mivel a repülési terv adatok pontosabb becslést tesznek lehetővé, ezért, ha rendelkezésre állnak, ezek alapján történik a várható pozíció (és más jellemzők) becslése, a radaradatok alapján történő becslést pedig azokra a járművekre használják, amelyekre csak ezek elérhetőek. Ehhez kapcsolódóan fontos megjegyezni, hogy a gyakorlatban előfordul, hogy nagyobb számú légi jármű jelenlétében a supervisor néhány azonosított légi járműre vonatkozóan is radaradatok alapján végzi a becslést, mivel az összes repülési terv egyidejű figyelembe vétele túl összetett feladat lenne. A tervezett automatizált forga-

¹ Temporary Restricted Airspace, Időszakosan korlátozott légtér

lombecsllő eszköz számára ugyanakkor mindez várhatóan nem jelent problémát, ezért a szimuláció során minden repülési tervvel rendelkező légi járműre vonatkozóan a repülési terv alapján végezzük a becslést.

A forgalom előrejelzését végző modul bemenetét minden esetben egy ténylegesen megvalósuló (vagy annak tekintett) légi forgalmi szituáció adatai adják. Ez a szituáció áll fenn az előrejelzés elvégzésének időpontjában (t_0). A szituációban jelen lévő repülőgépek egy része azonosított (rendelhető hozzá repülési terv), a többi pedig azonosítatlan. Előbbi halmazba azon repülőgépek többsége sorolható, amelyek az adott (jellegzetes felhasználási esetben a budapesti) ATC központ felelőssége alá eső légtérben tartózkodnak, azt elhagyták vagy abba rövidesen (kb. 10 percnél rövidebb időn belül) belépnek. Az azonosítatlan légi járművek általában olyan repülőgépek, amelyek közelednek a légtérhez, de túl távol vannak tőle ahhoz, hogy az erre szolgáló automatizált eszköz repülési tervet tudjon rendelni hozzájuk. Ugyanakkor lehetséges, hogy az előrejelzés időtávlátán (amely 15 vagy 20 perc is lehet) belül belépnek a légtérbe, ezért ezeket is figyelembe kell venni az előrejelzés során.

Az előrejelzés során a szituációban részt vevő összes repülőgéphez kapcsolódóan végre kell hajtani a megfelelő előrejelző funkciót egy meghatározott jövőbeni időpontra (t_p) vonatkozóan. Ennek első lépése minden repülőgép esetében annak eldöntése, hogy azonosított vagy azonosítatlan repülőgépről van-e szó, a további lépések pedig ennek eredményétől függenek. Ha a légi jármű azonosítatlan, akkor az előrejelzés csak radaradatok alapján történhet, annak feltételezése mellett, hogy a légi jármű az aktuális sebességvektorát és repülési szintjét nem fogja megváltoztatni. Ebben az esetben az előrejelzés a pozíció egyszerű extrapolációja a t_0 időpontban érvényes pozícióból ($x(t_0), y(t_0)$) kiindulva a sebességvektor és a becslés időtávja ($t_p - t_0$) alapján (2. ábra):

$$\begin{aligned} x(t_p) &= x(t_0) + (t_p - t_0)v_x \\ y(t_p) &= y(t_0) + (t_p - t_0)v_y \end{aligned} \quad (1)$$

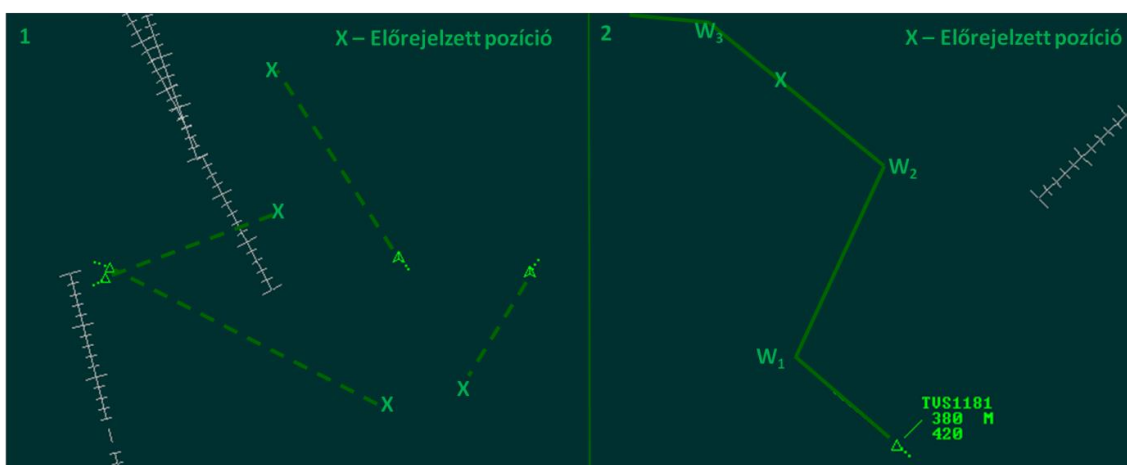
Az azonosított légi járművek esetében az előrejelzés a repülési terv adatok alapján történik. Az előrejelzés első lépése ilyenkor annak megállapítása, hogy melyik az utolsó útvonalpont, amelyet az előre jelzett időpontban (t_p) a repülőgép elhagy, azaz melyik W_i útvonalpontra teljesül a $t_{W_i} < t_p < t_{W_{i+1}}$ feltétel. Ezt követően el kell végezni a t_p időpontban érvényes földrajzi pozíció interpolációját a W_i és W_{i+1} útvonalpont között a W_i pontban mérhető sebességet (v_{W_i}) alapul véve (2. ábra):

$$\varphi = \arctg \frac{y_{W_{i+1}} - y_{W_i}}{x_{W_{i+1}} - x_{W_i}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x(t_p) &= x_{W_i} + (t_p - t_{W_i})v_{W_i} \cos \varphi \\ y(t_p) &= y_{W_i} + (t_p - t_{W_i})v_{W_i} \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Mivel a sebesség és a repülési szint jelentős változásai (és a földrajzi pozíció, ahol ezek megtörténnek) önálló bejegyzésként szerepelnek a repülési terv adatokban, ezért a t_p időpontban érvényes sebesség és repülési szint meg fog egyezni a W_i ponthoz tartozó sebességgel és repülési szinttel. A repülési terv- és radaradatok alapján a fenti funkciók valamelyikének használatával tehát előállítható a t_p időpontban várhatóan megvalósuló forgalmi szituáció olyan esetek-

ben, amikor a légtér egyes részei nem korlátozottak. Figyelembe kell azonban venni az előrejelzés szimulációja során, hogy a gyakorlatban utóbbi feltétel nem mindig teljesül – ezzel foglalkozunk a következő alfejezetben.



2. ábra Várható pozíció előrejelzése radaradatok (1) és repülési terv adatok (2) alapján

3.3. Légtérkorlátozások kezelése

Ahogy a 3.1. alfejezetben is szó volt róla, előfordulhat, hogy a légtér egyes részei tervezett korlátozás vagy zivatartevékenység miatt nem használhatóak. Természetesen az előre jelzett forgalmi szituációra vonatkozóan nem megengedhető sem az, hogy egy légi jármű várható pozíciója korlátozott tartományba essen, sem az, hogy a várható pozíció meghatározásakor feltételezett útvonal korlátozott tartományt érintsen. Emiatt a 3.2-ben bemutatott előrejelző funkciók korlátozások esetén nem minden légi járműre használhatóak.

Ha vannak korlátozott tartományok a légtérben, akkor mind az azonosítatlan, mind az azonosított légi járművek feltételezett útvonalát módosítani kell és a módosított útvonalakra kell alkalmazni a várható pozíciót előrejelző funkciókat. A módosított útvonalak meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a korlátozás tervezett vagy az időjárás miatt alakult ki. Aszerint, hogy a légi jármű azonosított vagy azonosítatlan és hogy a korlátozás tervezett vagy időjárás miatti, négyféle esettel kell foglalkozni az előrejelzés modellezése során.

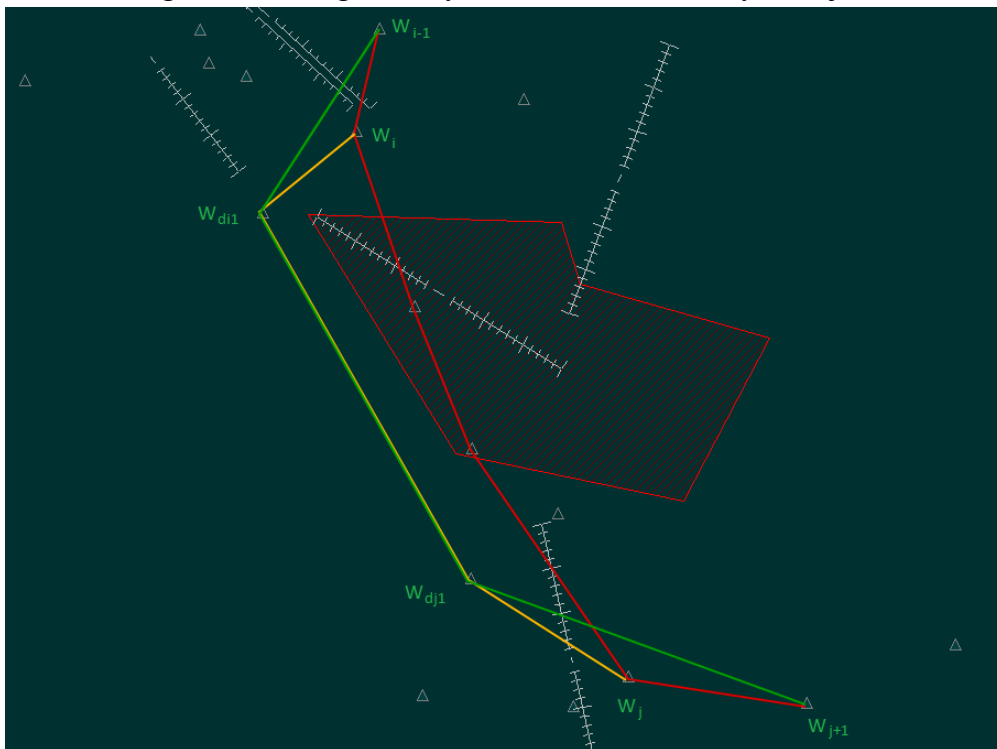
Azonosított légi járművek esetében nem jellemző, hogy a tervezett útvonal tervezetten korlátozott légtérrel érint, mivel a repülési tervek elkészítésekor általában figyelembe veszik a korlátozott légtértartományokat. Ugyanakkor teljesen nem is zárható ki a felvázolt eset megvalósulása, ezért figyelembe kell venni az előrejelzés modelljében. A tervezett korlátozás előnye az időjárás alapúval szemben a légiforgalmi irányítás szempontjából az, hogy a korlátozás időtartama és a korlátozott tartomány kiterjedése pontosan meghatározott, továbbá mindkettőről valós idejű információ áll rendelkezésre. Ennek köszönhetően lehetőség nyílik a tartomány elkerülésének korai megtervezésére úgy, hogy a kerületi útvonal szabványos jelentőpontok mentén haladjon. Ennek azért van jelentősége, mert szabványos pontok nélkül a légi jármű irányításához folyamatos kiemelt figyelemre és rendszeres utasításokra lenne szükség a légiforgalmi irányítótól, ami hátrányosan hatna a munkaterhelésre és ezáltal a biztonságra.

A szimulált kerülés tehát azonosított légi járművek és tervezett korlátozások esetén szabványos útvonalpontok mentén történik. Az útvonal meghatározásához először meg kell keresni azt a szakaszt (vagy szakaszokat) a repülési terv által meghatározott útvonalon, amely keresztezi a korlátozott tartományt. Ha ez megtörtént, az első ilyen szakasz kezdőpontja (W_i) lesz az a pont, amelynél a légi jármű elhagyja az eredetileg tervezett útvonalat (azaz megkezdji a kerülést) és az utolsó ilyen szakasz végpontja (W_j) lesz, ahol visszatér arra. Ezt követően meg kell keresni azt a szabványos pontot (W_{di1}), amely a W_i pontból indulva, egyenesen haladva a leg-rövidebb úton elérhető anélkül, hogy az útvonal keresztezné a korlátozott tartományt. Ehhez hasonlóan meg kell keresni azt a pontot is (W_{dj1}), amelyből indulva hasonló feltételek mellett a W_j pont a legrövidebb úton elérhető. Ha a $[W_{di1}, W_{dj1}]$ szakasz nem keresztezi a korlátozott tartományt, akkor az első lehetséges kerülési útvonal a W_i , W_{di1} , W_{dj1} , és W_j pontok által meghatározott útvonal lesz. Ha a $[W_{di1}, W_{dj1}]$ szakasz keresztezi a korlátozott tartományt, akkor a W_{di1} és W_{dj1} pontok megkereséséhez használt algoritmust felhasználva, ezekből a pontokból kiindulva meg kell keresni a W_{di2} és W_{dj2} pontokat. A hasonló pontok keresését (mindig az előző két megtalált pontból kiindulva) addig kell folytatni, amíg nem találunk olyan pontpárt (W_{din} és W_{djn}), amelyeket összekötő szakasz már nem keresztezi a korlátozott tartományt. Ha ezeket a pontokat megtaláltuk az egyik lehetséges kerülési útvonal a W_i , W_{din} , W_{djn} , és W_j által meghatározott útvonal lesz (3. ábra).

Mivel – ahogyan korábban is utaltunk rá – tervezett korlátozás esetén az irányítás hamarabb tudja elkészíteni a kerülésre vonatkozó tervet, előfordulhat, hogy az útvonalpont, amelyiknél a kerülés elkezdődik, és amelyiknél véget ér, nem a korlátozott tartomány elérését megelőző utolsó-, illetve a tartomány elhagyását követő első pont. Ezek helyett kezdődhet a kerülés egy korábbi pontban (pl. W_{i-1}) vagy befejeződik egy későbbi pontban (pl. W_{j+1}). Ezt a lehetőséget a szimuláció során úgy vesszük figyelembe, hogy feltételezzük, hogy az ezért felelős légiforgalmi irányító a kerülés végrehajtatása előtt fejben felvázol néhány lehetséges kerülési útvonalat különböző kiinduló- és végponttal, majd ezek közül kiválasztja azt, amelyik a legrövidebbnek tűnik. Más szavakkal a szimuláció során több lehetséges kerülési útvonal hosszát is kiszámítjuk, és azt használjuk közülük, amelyik hossza a legkisebb, azaz amelyik a leggyorsabb kerülést teszi lehetővé (mivel a kerülés során a sebességet állandónak tekintjük). A meghatározott útvonalpontokat és lehetséges kerülési útvonalakat egy adott szituációra a 3. ábra szemlélteti.

Ha egy azonosított légi járműnek időjárás miatt légteret kell elkerülnie, akkor a légiforgalmi irányítás máshogyan viselkedik, mint tervezett korlátozások esetében, ezért a szimuláció alapját képező modellben is máshogyan kell kezelni az ilyen eseteket. Az időjárás miatti kerülési útvonalak a légiforgalmi irányítók részéről nehezebben tervezhetőek előre, mivel a korlátozott tartomány elhelyezkedése folyamatosan változhat, ráadásul a tartomány jellemzőiről nem állnak rendelkezésre valós idejű adatok. Ezen felül – és részben éppen emiatt – az ilyen jellegű kerülést általában a légi járművek kezdeményezik azzal, hogy az irányítástól engedélyt kérnek a kerülésre, ami miatt még pontos adatok ismeretében is nehéz előrebecsülni, hogy a tervezett útvonal melyik pontján (D_{s0}) kezdődik (és melyik pontján (D_{f0}) fejeződik be) a kerülés. Ennek megfelelően az előrejelző eszköz algoritmusai nem előre definiált pontokat használ bizonyos meghatározott távolságra a korlátozott tartomány határától, hanem véletlenszerű pontokat egy meghatározott $[d_{min}, d_{max}]$ távolságtartományon belül (4. ábra). A korlátozott tartomány határának (és ezzel szoros összefüggésben a D_{s0} pont lehetséges helyének) meghatározása során a [6]-ban is látható megközelítést használjuk, amely szerint a zivatargócokat a bizonytalanság kezelése és a biztonság érdekében

bizonyos távolságnál (amely a szimuláció során konfigurálható) jobban nem közelíthetik meg a légi járművek. Ebből következően a szimulációban a zivatargócok határoló vonalait azokkal párhuzamos, tőlük a megadott távolságra elhelyezkedő vonalakkal helyettesítjük.

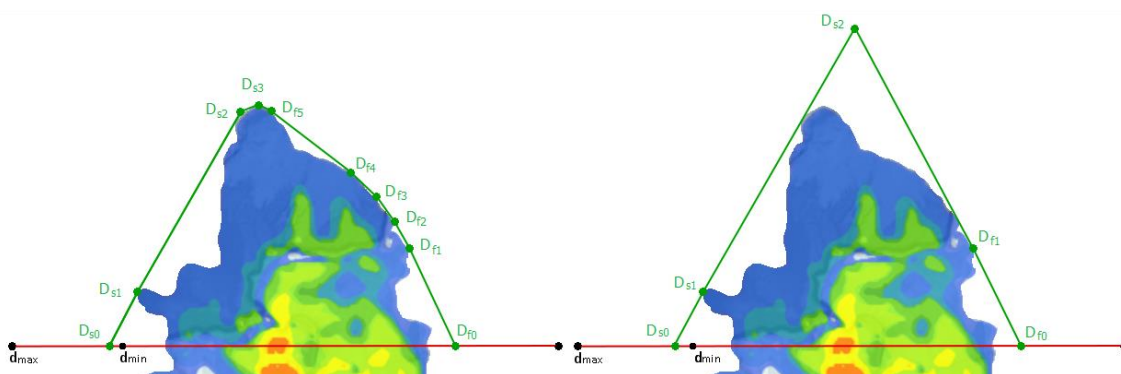


3. ábra Tervezetten korlátozott légtértartomány kerülésének lehetséges útvonalai

További eltérést jelent időjárás miatti korlátozás esetén, hogy a kerülési útvonal nem feltétlenül szabványos útvonalpontok mentén halad. Emiatt a kerülési modell megalkotásakor nem használható a korábban ismertetett, diszkrét pontok közötti választáson alapuló algoritmus sem. Ehelyett analitikus módszerrel kell megtalálni azt a kerülési utat, amelynek hossza minimális és a légiforgalmi irányítók által gyakorlatban követett eljárások alapján megvalósítható. Az ezen feltételeknek megfelelő útvonalak azok, amelyeknek az első szakasza és utolsó szakasza is pontosan egy pontban (D_{s1} és D_{f1}) érinti a korlátozott tartományt. Az ilyen útvonalak közül az lesz a lehetséges legrövidebb, amelyiknek az első szakasza a D_{s1} pontban ér véget, az utolsó szakasza a D_{f1} pontban kezdődik, a két pont között pedig a korlátozott tartomány kiterjedésétől függő számú további szakasz alkotja, amelyek mind pontosan egy pontban ($D_{s2}..D_{sn}$, $D_{f2}..D_{fm}$) érintik a tartományt szimbolizáló síkidomot vagy illeszkednek annak valamely oldalára. A hossz szempontjából optimális kerülési útvonal pontjait tehát olyan rekurzív algoritmus használatával kellene megkeresni, amely minden lépés során kicserél egy-egy pontot az adott pontból induló és a tartományt érintő félegyenes érintési pontjára addig, amíg nem talál újabb érintési pontokat (ekkor az utolsó szakaszok meghosszabbításának metszéspontja lesz az utolsó keresett pont) vagy egybeeső pontokat talál.

Figyelembe kell venni ugyanakkor, hogy az optimális kerülési útvonal modellezése nem egyszerű geometriai problémamegoldás. Nem szabad ugyanis megfeledkezni arról, hogy az útvonalat leíró pontok ($D_{s1}..D_{sn}$, $D_{f1}..D_{fm}$) valójában egy-egy légiforgalmi irányítói utasításnak (vagy engedélyadásnak) felelnek meg. Ebből következően minden változás a kerülési útvonal

irányában a korábbihoz képest további döntések meghozását igényli az irányító részéről és további kommunikációs tevékenységet eredményez az irányítás és a légitársaságok között. Ha emellett azt is figyelembe vesszük, hogy a kerülést egy időben általában több repülőgépnél is végrehajtani kell, mondhatjuk, hogy a töréspontok számának növelése a kerülési útvonalon növeli a légitársasági irányítók (és a repülőgép-személyzetek) munkaterhelését, ezáltal növelve a hibázás valószínűségét és csökkentve a biztonságot. Mivel a kerülés biztonságos végrehajtása fontosabb, mint a kerülés miatti késés minimalizálása, ezért a kerülési útvonal modellezése során is fontosabb szempont a töréspontok számának alacsony szinten tartása, mint az útvonal teljes hosszának minimalizálása. Ennek megfelelően az előrejelzést végző eszköz kezdeti verziójában a kerülés szimulációja maximum három töréspont felhasználásával történik. A kétféle felvázolt módszerrel előállítható kerülési útvonalak a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra Időjárás miatt korlátozott légtér tartomány kerülésének modellje tetszőleges számú- és legfeljebb három útvonalpont használatával (az ábra a modell működésének szemléltetésére szolgál – a valóságban a kerülés nem a zivatargócok fizikai határán, hanem attól távolabb, de azt követve megy végbe)

Fontos ugyanakkor szem előtt tartani, hogy a pontok számának ilyen mértékű behatárolása bizonyos szituációkban a valóságot rosszul közelítő szimulált kerülési utakat eredményezhet, amelyek megengedhetetlenül nagy késést jelentenének a kerülést végző járművek számára. Az ilyen esetek elkerülése érdekében az eszköz későbbi verzióiban érdemes lesz inkább egyfajta módosított algoritmust használni a minimális hosszúságú útvonal meghatározására, amely a szakaszok összesített hosszához minden új töréspont bevezetésekor hozzáadna egy meghatározott értéket (amelynek meghatározását gyakorló légitársasági irányítási szakemberekkel közösen kell majd elvégezni). A jelenlegi verzió további hiányossága lehet, hogy nem veszi figyelembe a zivatartevékenység dinamikus jellegét, vagyis azt, hogy az a kerülés ideje alatt akár meg is szűnhet. Emiatt, ha az eszköz verifikációja során az derül ki, hogy a jelenlegi algoritmusok alapján szimulált kerülési útvonalak nem közelítik elég jól a valóságban várható útvonalakat, akkor ezek helyett érdemes megfontolni olyan külső fejlesztésű modellek alkalmazását, mint a [7]-ben ismertetett geometriai modell.

Ha a kerülést azonosítatlan légitársaságokra vonatkozóan kell szimulálni, akkor nem használhatóak a repülési terv alapján előálló útvonalszakaszok a kerülés lehetséges kezdő- és végpontjának meghatározásához. Ugyanakkor – más lehetőség nem lévén – tekinthetünk úgy a légitársaságok aktuális haladási iránya által meghatározott egyenesre, mint a következő 10–20 percre vonatkozó repülési tervből vett útvonalra, visszavezetve ezzel a kerülés modellezésének problémáját a repülési tervvel rendelkező légitársaságok esetére. Ennek megfelelően az időjárás miatt

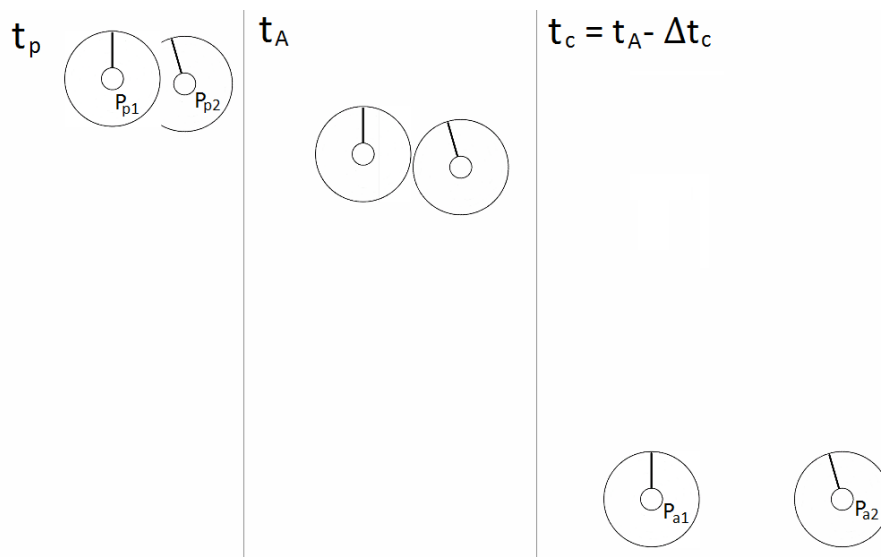
korlátozott légtértartományok kerülésének szimulációja az azonosított légi járművekkel kapcsolatban ismertetett módszerrel történik. Kissé más a helyzet akkor, ha tervezett korlátozásról van szó, mivel – ahogyan már szó volt róla – ilyen esetben a kerülést szabványos útvonalpontok mentén szimuláljuk, a radaradatokból előállított egyenes útvonal azonban nem biztos, hogy tartalmaz ilyeneket. Ilyen esetben tehát először meg kell vizsgálni, hogy az egyenes útvonalon található-e szabványos útvonalpont még a korlátozott tartományt keresztező szakasz előtt, illetve az után (mivel a légi járművek általában valamilyen szabványos pont irányába repülnek, ezért utóbbi ez esetek többségében várhatóan teljesülni fog). Ha vannak ilyen pontok, akkor a kerülés modellezésére az azonosított légi járművek esetében alkalmazott módszert használjuk, míg ha nincsenek, akkor a tervezetten korlátozott tartományt időjárás miatt korlátozott tartománynak tekintjük és az erre vonatkozó szimulációs módszert alkalmazzuk.

4. SZITUÁCIÓK VALIDÁLÁSA

Az előző fejezetben felvázolt algoritmusok és funkciók segítségével előállíthatóak az előre jelzett szituációk, ezek azonban nem biztos, hogy a gyakorlatban biztonságosan (az előírt elkülönítési minimum sérülése nélkül) megvalósíthatóak. Emiatt az előre jelzett szituációk véglegesítése előtt végre kell hajtani azokon egyfajta validáló funkciót, amely ellenőrzi, hogy az előállt szituációra teljesülnek-e az előírt biztonsági követelmények és korrigálja a szituációt, ha nem. Az ennek alapjául szolgáló algoritmus első lépése tehát az ellenőrzés, amely során az összes légi jármű esetében ki kell választani a többi légi jármű közül azokat, amelyek repülési szintje kevesebb, mint 10 egységgel tér el az adott járműtől, majd mindegyikre vonatkozóan meg kell vizsgálni, hogy a földrajzi pozícióik távolsága eléri-e az 5 NM-t. Ha utóbbi feltétel nem teljesül, akkor korrigálni kell a szituációt. A korrekció során a két, nem megfelelően elkülönített légi jármű közül az egyiknek (amelyet az eszköz kezdeti verziójában véletlenszerűen választunk ki) módosítani kell a pozícióját úgy, hogy az elkülönítési feltételek teljesüljenek. Ennek végrehajtása során azt feltételezzük, hogy az irányítás már jóval az elkülönítési minimum sérülése előtt észrevette annak lehetőségét és elhárította a konfliktust. A korrekciós funkció végrehajtása tehát lényegében a konfliktusok elhárításának szimulációját jelenti.

A konfliktus elhárításának modellezése során két kérdésre kell megadni a választ. Az első kérdés, hogy mikor kezdi el az ezért felelős légiforgalmi irányító a konfliktus elhárítását. Ezzel kapcsolatban azzal a feltételezéssel élünk, hogy az irányító az STCA² eszköz jelzésének első pillanatában (t_A) vagy az ezt meg-előző rövid időszámban (Δt_c) észlelte a konfliktust és kiadta az elkerüléséhez szükséges első utasítást. Az, hogy a Δt_c időtartományon belül melyik t_c időpontban következik be, a szimuláció során véletlenszerűen dől el (a bekövetkezés valószínűsége minden időpontban azonos), mivel a gyakorlatban a supervisor sem tudna ezzel kapcsolatban pontos előrejelzést adni. A konfliktus elhárítása tehát a t_c időpontban kezdődik, ezért az elhárítás szimulációjának első lépéseként el kell végezni az előrejelzést a két konfliktusban lévő légi jármű pozíciójára (P_{a1} és P_{a2}) és ezeket kell a konfliktus elhárítása szempontjából aktuális pozícióként kezelni (5. ábra).

² Short Term Conflict Alert, Rövidtávú konfliktusjelzés



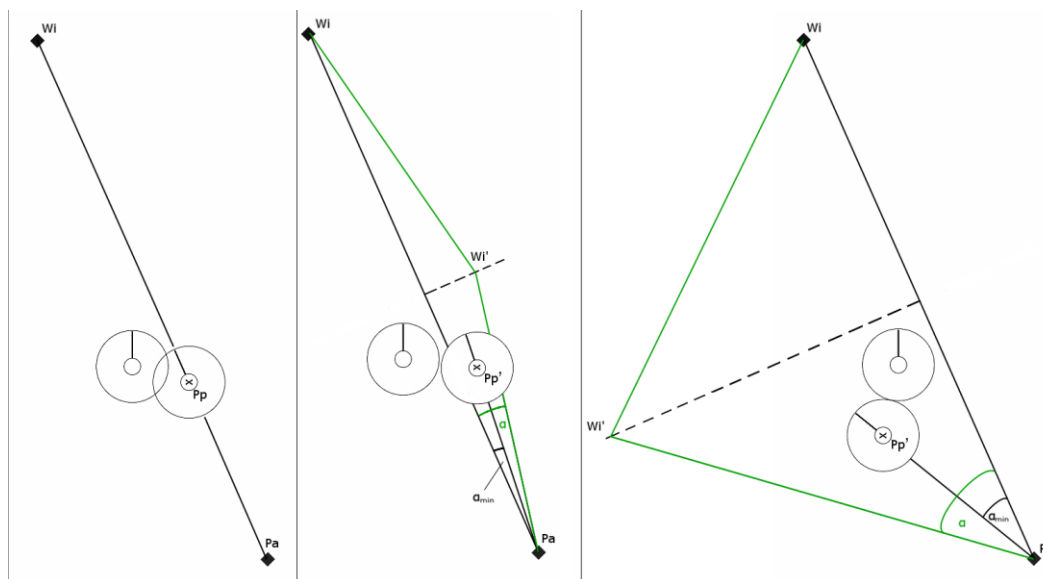
5. ábra Konfliktusban lévő légitársaságok pozíciója a szimuláció különböző időpontjaiban

A másik kérdés az, hogy milyen módszerrel hárítja el az irányító az észlelt konfliktust. A gyakorlatban a konfliktus megszüntetéséhez az irányítás a repülőgépek jellegzetes paraméterei, azaz a haladási irány, a sebesség nagysága és a repülési szint közül bármelyiket megváltoztathatja. Utóbbi két paraméter esetében a lehetséges értékek és az értékek változtatásának sebessége is nagyban függ a légitársaság típusától, míg a haladási irány megváltoztatására bármely légitársaság képes kell, hogy legyen. Mivel az eszköz kezdeti verziójában a légitársaságok típusait nem vesszük figyelembe, ezért a konfliktus-elhárítás szimulációja során csak a haladási irány módosítását engedélyezzük. A haladási irány módosítása a szimulációhoz használt modellben a légitársaság aktuális pozíciója (P_a) és következő útvonalpontja (W_i) közti szakasz helyettesítését jelenti két másik szakasszal, azaz egy új útvonalpont (W_i') beiktatásával (6. ábra). Ennek a módosított útvonalnak biztosítania kell, hogy megszűnjön a konfliktus a két adott légitársaság között úgy, hogy az irányváltoztatásra utasított jármű a legkisebb idővesztéssel juthasson el a W_i pontra. Utóbbi akkor valósulhat meg, ha a W_i' pont a $[P_a, W_i]$ szakasz felezőmerőlegesén helyezkedik el. Ebből következően a W_i' pont pontos helyének meghatározásához elegendő a konfliktus elkerüléséhez szükséges iránymódosítás szögét (α) kiszámítani. A szög szükséges értékére alsó becslés (α_{min}) adható azzal, hogy kiszámítjuk, mekkora szöggel kell minimálisan elforgatni a $[P_a, P_p]$ szakaszt a P_a pont körül, hogy t_p időpontban ne álljon fenn az elkülönítési minimum sérülése ($d(P_n, P_m)$ a P_n és P_m pont távolságát jelöli, P_p' pedig a módosított útvonalon haladó légitársaság várható pozícióját t_0 -ban):

$$\alpha_{min} = \arccos \frac{d(P_a, P_p)^2 + d(P_a, P_p')^2 - d(P_p, P_p')^2}{2d(P_a, P_p)d(P_p, P_p')} \quad (4)$$

Mivel az így kiszámított szög szerinti iránymódosítás egyes esetekben (ha a két légitársaság távolsága t_p időpontban nem növekszik) csak késlelteti az elkülönítési sérülést, de nem hárítja el, ezért a minimálisnál nagyobb szöget érdemes használni a forgatáshoz. Ezt a szimuláció során úgy oldjuk meg, hogy a minimális szögértéket szorozzuk egy konfigurálható, 1-nél nagyobb számértékkel (alapértelmezésben 2), amivel nem csak a fenti problémát küszöböljük ki, hanem azt is figyelembe vesszük, hogy a légiforgalmi irányítók biztonsági megfontolásból általában a

konfliktus elhárításához minimálisan szükségesnek ítélnél nagyobb szöggel módosítják a haladási irányt. Mivel a légi jármű haladási iránya két irányban is módosítható, ezért a szöget mindkét irányra ki kell számítani, majd meg kell vizsgálni, hogy a módosított útvonal teljes hossza melyik irány esetén lesz kisebb és a továbbiakban ezt az irányt kell figyelembe venni a szimuláció során. A konfliktus elhárításának modellezésére és szimulációjára szolgáló módszer működését a 6. ábra mutatja be.



6. ábra Konfliktusban lévő légi jármű útvonalának módosítása

A felvázolt validáló funkció tényleges végrehajtása kétféle módszerrel történhet. Az első módszer esetében csak a t_p időpontra előre jelzett szituációra végezzük el az ellenőrzést és a korrekciót, míg a második módszerrel egy vagy több ezt megelőző szituációra is. Mivel az első módszerrel a funkciók csak egyszer hajtódnak végre, a szükséges számítások rövidebb idő alatt végezhetőek el, ami fontos követelmény egy olyan eszköz esetében, amelytől valós idejű információszolgáltatást várnak el. Ezzel a módszerrel ugyanakkor nem szűrhetőek ki az olyan esetek, amelyek során a t_p időpontra előre jelzett szituáció ugyan nem tartalmaz elkülönítés sérülést, a szituáció kialakulásához vezető szimulált folyamat során korábban azonban előfordult ilyen, vagyis nem teljesül az a feltétel, hogy az előre jelzett szituáció biztonságosan megvalósítható.

Megbízhatóbb eredményeket kaphatunk tehát, ha a validálást nem csak a végső előre jelzett szituációra végezzük el, hanem a kiindulási szituáció időpontjától (t_0) indulva állandó időközű (pl. 30 s vagy 60 s) lépésekkel haladva újabb és újabb előre jelzéseket végzünk és minden így előállt szituációra elvégezzük a validálást. Az újabb szituációk előre-jelzése során a légi járművek adataiban természetesen figyelembe vesszük a legutóbbi előre jelzett szituáció validálása során végrehajtott esetleges korrekciókat is. Látható tehát, hogy utóbbi módszer bár pontosabb, az erőforrásigénye lényegesen nagyobb. Ebből fakadóan azt, hogy az egy lépéses vagy a több lépéses validációt alkalmazzuk (továbbá utóbbi esetében a lépések számát) az határozza meg, hogy az automatizált légiforgalmi irányítási rendszer, amelyben az eszközt használni tervezik milyen számítási kapacitással rendelkezik. Szempont lehet ennek eldöntésében továbbá az, hogy a több lépéses validáció használata mennyivel növeli az előrejelzés pontosságát, mert ha ez a növekedés elhanyagolható, nem kell a jóval költségesebb másik módszert használni. Az

ezzel kapcsolatos döntést – olyan további döntésekkel együtt, mint például a korábbi fejezetekben bemutatott különböző algoritmusok paramétereinek optimális értékei – nem kell feltétlenül a fejlesztés jelenlegi szakaszában meghozni, ha inkrementális fejlesztési folyamatot [8] alkalmazva elkészítjük az eszköz egy működőképes, de nem feltétlenül optimális verzióját, majd ezt folyamatosan validáljuk és frissítjük (lehetőség szerint a célrendszeren futtatva).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Mivel a munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfiguráció meghatározását mindig a jövőben várható forgalmi helyzetre vonatkozóan kell elvégezni, elengedhetetlen, hogy egy szektorkonfiguráció számításra szolgáló eszköz jövőbeni szituációk előrejelzésére. Az előrejelzést az aktuális forgalmi helyzet adatai alapján kell elvégezni, de figyelembe kell venni, hogy a légi járművek eredetileg tervezett útvonala módosulhat a légtér egyes tartományainak korlátozása miatt. Emellett – részben éppen a korlátozott tartományok kerülése miatt – előfordulhat, hogy a tervezett útvonalat követő légi járművek között nem megengedett értékre csökken az elkülönítés, amit az irányítás az esetek többségében megakadályoz újabb útvonal módosításokkal, ezt pedig a szimulációban is figyelembe kell venni.

Egy adott kezdeti forgalmi helyzetből kiindulva az előző fejezetekben felvázolt algoritmusok használatával sokféle különböző előre jelzett szituációkat állíthatunk elő annak köszönhetően, hogy az algoritmusok legtöbb paraméterének (például kerülési útvonal kezdőpontjának távolsága a korlátozott tartománytól, fordulás szöge konfliktus feloldásnál stb.) értéke változtatható. Fontos, hogy ezen szimulált szituációk közül ki tudjuk választani azokat, amelyek a legjobban közelítik a valóságban adott kezdeti feltételek mellett kialakuló szituációt. Ehhez meg kell találni a paraméterekhez a valóságot legjobban közelítő értékeket, ami történhet az eszköz által előre jelzett szituációk és a ténylegesen megvalósult (vagy szakemberek által gyakorlati ismeretek alapján előrebecsült) szituációk összehasonlításával, illetve szakemberek megkérdezésével a gyakorlatban jellemző értékekről vagy arról, hogy egy-egy előre jelzett szituáció mennyire valószínű. Utóbbi módszerhez szükség lehet arra, hogy az előre jelzett szituációkat vizuálisan bemutathassuk a megkérdezetteknek, amihez – bár a végső felhasználás során nem lesz rá szükség – érdemes az előrejelző eszközt a szituációk grafikus megjelenítésére is alkalmassá tenni. Az eszköz fejlesztésének következő szakaszában tehát a paraméterek konfigurálásával és ehhez kapcsolódóan a megjelenítő funkció létrehozásával foglalkozunk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Blackman, H.S., Gertman, D.I., Boring, R.L.: Human Error Quantification Using Performance Shaping Factors in the SPAR-H Method, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2008 Annual Meeting (2008)
- [2] Strenzke, R., Schulte, A.: Modeling the Human Operator's Cognitive Process to Enable Assistant System Decisions, Proceedings of the 21st International Conference on Automated Planning and Scheduling (2011)
- [3] Gianazza, D., Guittet, K.: Evaluation of air traffic complexity metrics using neural networks and sector status, Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Air Transportation, ICRAAT 2006 (2006)
- [4] Song, L., Wanke, C., Greenbaum, D.: Predicting Sector Capacity for TFM, Proceedings of the Seventh USA/Europe ATM R&D Seminar (2007)
- [5] Számel Bence, Szabó Géza: Air Traffic Control Workload Parameters and their Application for Sector Configuration Advisory Tool, Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, (2015)
- [6] Tian, Y., Wan, L., Chen, C. és Yang, Y.: Safety assessment method of performance-based navigation airspace planning. Journal of Traffic and Transportation Engineering (2015)

- [7] Yoon, Y., Hansen, M., Ball, M. O.: Optimal route decision with a geometric ground-airborne hybrid model under weather uncertainty, *Transportation Research Part E* 48, 34-49. (2012)
- [8] Schuster György, Terpecz Gábor: Inkrementális fejlesztés és tesztelés biztonságkritikus rendszerek esetén, *Repüléstudományi Közlemények*, Szolnok, 2014/2, pp. 467–473.

DEVELOPMENT OF THE TRAFFIC PREDICTION MODULE OF A DECISION SUPPORT TOOL FOR SECTOR CONFIGURATION PLANNING

In an Air Traffic Control system, the decision about the sector configuration that results in an optimal level of controller workloads made by the supervisor based on his personal skills and experience. However, for safety and efficiency reasons make it advisable to support this decision process by an automated tool which is able to provide suggestions about the optimal sector configuration. Such a tool is required to simulate every step of the supervisor's decision process, including the prediction of the traffic situation expected to occur in the near future. In this paper, we present the functions that need to be implemented by the traffic prediction module of the decision support tool as well as the algorithms that make these functions work. Besides presenting the simple projection of aircraft position, simulation of the avoidance of restricted airspace segments or the actions of air traffic controllers will also be considered.

Keywords: *Air Traffic Control, decision support, traffic prediction, simulation, resolving conflict*

Számel Bence Domonkos (MSc)
PhD hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

szamel.bence@mail.bme.hu
orcid.org/0000-0002-2844-184X

Dr. Szabó Géza, PhD
egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

szabo.geza@mail.bme.hu
orcid.org/0000-0002-5956-0868

Számel Bence Domonkos (MSc)
PhD student
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Transportation Engineering and Vehicle
Engineering

Department of Control for Transportation and Vehicle
Systems

szamel.bence@mail.bme.hu
orcid.org/0000-0002-2844-184X

Dr. Szabó Géza, PhD
Associate Professor
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Transportation Engineering and Vehicle
Engineering

Department of Control for Transportation and Vehicle
Systems

szabo.geza@mail.bme.hu
orcid.org/0000-0002-5956-0868



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-12-0395_Szamel_Bence-Szabo_Geza.pdf