

Az időjárás körülmények figyelembe vétele a légiforgalmi szektorkapacitás irányítói munkaterhelés alapú számítása során

Számel Bence* Szabó Géza**

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest (e-mail: szamel.bence@mail.bme.hu).

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

Abstract: A légiforgalmi irányítók munkaterhelése szempontjából az egyik leglényegesebb tényező a légtérben uralkodó időjárás, amit emiatt célszerű figyelembe venni az optimális szektorkonfigurációnak a munkaterhelést befolyásoló tényezők értékeire alapozott számítása során. Ezt nehezíti, hogy az időjárás – és elsősorban a zivatartevékenység – jellemzőit nehéz egyértelműen számszerűsíteni. Cikkünkben lehetőségeket vázolunk fel arra, hogyan lehet számszerűen figyelembe venni az időjárást a szektorkonfiguráció becslése során közvetlenül vagy más tényezőkre gyakorolt hatása alapján.

1. BEVEZETÉS

Annak érdekében, hogy a légterekben lebonyolítható forgalom nagysága (más szóval a légtér kapacitása) megfeleljen a légi közlekedés teljesítőképességével kapcsolatos, folyamatosan növekvő igényeknek, a légiforgalmi irányítási (Air Traffic Control, ATC) rendszerekben a szektorizációt, azaz a légtér forgalmának több irányító közötti felosztását alkalmazzák. A szektorizáció térbeni (szektorhatárok elhelyezkedése) és időbeni (szektorok nyitásának és zárásának időpontja) megvalósítása hatással van az ATC rendszer – és ezen keresztül a légi közlekedés – biztonságára és hatékonyságára, mivel ezek a tényezők határozzák meg, hogy egy-egy légiforgalmi irányító adott pillanatban mekkora és milyen jellemzőkkel bíró forgalmat kezel.

Az irányított forgalom nagysága (légijárművek száma) és komplexitása befolyásolja az irányítók munkaterhelését, mivel a nagyobb és/vagy komplexebb forgalom több tényező ésszben tartását és döntések során történő figyelembe vételét igényli, továbbá több kommunikációval jár. Az irányítói munkaterhelés ugyanakkor meghatározó a légi közlekedés biztonsága és hatékonysága szempontjából. A túlzottan magas munkaterhelés növeli az irányítói hibák gyakoriságát és súlyosságát (Rodgers *et al.*, 1998), ami az előírt elkülönítési minimumok sérülését eredményezheti, szerencsétlen esetben pedig baleset is vezethet. A túlzottan alacsony munkaterhelés ugyanakkor szintén nem kívánatos állapot (Stagel & Hameluck, 1990). Ennek egyik oka, hogy az alacsony munkaterheléssel dolgozó irányító valószínűleg képes lenne további légijárművek irányítására is, vagyis az irányítás hatékonysága javítható lenne. A másik ok, hogy ilyen esetben előfordulhat, hogy az irányító kevésbé összpontosít a feladataira és könnyebben elterelik a figyelmét különféle viselkedést befolyásoló tényezők (pl. zaj, hőmérséklet, belső problémák stb.), ami szintén gyakoribb és súlyosabb hibákhoz vezethet.

Mindezek alapján tehát azt mondhatjuk, hogy a biztonságos és hatékony légiforgalmi irányítás érdekében az irányítók munkaterhelését az optimális szint közelében érdemes tartani, ehhez pedig arra van szükség, hogy a szektorkonfiguráció (az aktuálisan használt szektorhatárok) az üzemidő minél nagyobb részében optimális legyen. Ennek megvalósítása érdekében szükség van egy olyan módszer kidolgozására, amely segítségével az irányított forgalom és -légtér különböző jellemzői (komplexitási tényezői) alapján lehetséges becslést adni a különböző lehetséges szektorkonfigurációk mellett fellépő munkaterhelésre. A szóban forgó jellemzők közül az egyik legérdekesebb az időjárás, részben mert a légiforgalmi irányítók véleménye alapján ez van a legnagyobb hatással a munkaterhelésre, részben pedig mert más tényezőkhöz képest kevésbé kínálkozik egyértelmű lehetőség a számszerű kifejezésére.

A 2. fejezetben röviden ismertetünk egy lehetséges módszert a különböző komplexitási tényezők fontosságának felmérésére és az eredmények felhasználására az optimális szektorkonfiguráció becslése céljából. A 3. fejezetben bemutatjuk, milyen jelentősége van az időjárásnak a légi forgalom és a légiforgalmi irányítás szempontjából, a 4. fejezetben pedig megvizsgáljuk az időjárás, mint komplexitási tényező figyelembe vételének lehetőségét a szektorkapacitás becslése során. Végül, az 5. fejezetben összefoglaljuk az addigiakat és felvázoljuk az időjárás figyelembe vételével kapcsolatos továbblépési lehetőségeket.

2. MUNKATERHELÉS ALAPÚ SEKTORKONFIGURÁCIÓ SZÁMÍTÁS

Az adott jellemzőkkel rendelkező forgalomhoz rendelhető optimális szektorkonfiguráció számításának egyik lehetséges módszere (Gianazza & Guittet, 2006)-ban látható. A módszer alkalmazása során a következő lépésben keresztül válik lehetségessé az optimális szektorkonfiguráció becslése a komplexitási tényezők értékei alapján:

1. Vizsgált komplexitási tényezők halmazának meghatározása;
2. Vizsgált forgalmi szituációk kiválasztása vagy létrehozása;
3. Optimálisnak tekintett szektorkonfiguráció hozzárendelése a vizsgált forgalmi szituációkhoz;
4. Komplexitási tényezők értékei és szektorkonfiguráció közötti összefüggés feltárása neurális háló segítségével;
5. Szektorkonfiguráció becslése ismeretlen forgalmi szituációkra a neurális háló által szolgáltatott paraméterértékek felhasználásával.

Mivel a módszer első két lépése során végrehajtandó feladatok és azok eredményei légtérként és légiforgalmi irányítási központként eltérőek lehetnek – a többi lépés pedig ezek eredményeire épül – ezért a módszer alkalmazhatóságának vizsgálata érdekében végrehajtottuk ezeket a magyar légtér vonatkozásában. Ennek részletes folyamata és eredményei (Számel *et al.*, 2015)-ben olvashatók.

Az első lépés megvalósításához szükség van a komplexitási tényezők egy lehetséges halmazára, amelyből később előállítható az a tényezőhalmaz, amit a neurális hálós számítások során ténylegesen figyelembe veszünk. A tényezőknek ezen halmazát részben korábbi, hasonló témájú kutatások (pl. Majumdar *et al.*, 2005, Masalonis *et al.*, 2003) eredményeinek felhasználásával, részben pedig a légiforgalmi irányítás szervezésének területén komoly tapasztalattal rendelkező szakértők tanácsai alapján állítottuk össze. Ezek eredményeképpen az 1. táblázatban felsorolt lehetséges munkaterhelést befolyásoló tényezőket azonosítottuk.

A végső tényezőhalmaz kialakításának következő lépése a komplexitási tényezők fontosságával kapcsolatos információ beszerzése volt. Ennek érdekében megkértünk jónéhány aktív légiforgalmi irányítót és supervisort, hogy töltsön ki egy kérdőívet a tényezők munkaterhelés növelő hatásának mértékével kapcsolatban. A kérdőívben a válaszadóknak 1-től 5-ig terjedő skálán kellett meghatározniuk, hogy saját tapasztalataik alapján milyen mértékben járulnak hozzá az egyes tényezők a munkaterheléshez, valamint azt hogy a tényezők értéke a munkájuk során mennyire tekinthető állandónak, illetve milyen gyakran változik. A kérdőív eredményei alapján a különböző komplexitási tényezőkhöz rendelhető átlagos fontossági értékek szintén az 1. táblázatban olvashatók.

A neurális hálós számítások folyamán felhasznált tényezőhalmaz létrehozása során a legkézenfekvőbb módszer az lett volna, ha a kérdőív eredményei alapján legfontosabbnak tűnő tényezőket vesszük figyelembe. Nem tekinthetünk el ugyanakkor attól a tényőtől sem, hogy a neurális háló használatához annak bemeneti paramétereit számszerű értékekkel kell kifejezni, vagyis csak azokat a komplexitási tényezőket használhatjuk fel bemeneti paraméterként, amelyekhez lehetséges számszerű értéket

rendelni. Természetesen bármelyik tényezőhöz rendelhető számszerű érték a tényező jelentéstartalmának megfelelő matematikai modellezésével, azonban ezen modell összetettsége, valamint az így előállított érték és a munkaterhelést befolyásoló hatás közti kapcsolat egyértelműsége tényezőnként eltérő.

1. táblázat: Lehetséges komplexitási tényezők és munkaterhelés növelő hatásuk átlagértéke

Tényező	Átlag
Időjárás (pl. zivatarvevényesség)	4,57
Érkező, induló és átrepülő járatok aránya	3,86
Forgalom térbeli eloszlása ("sűrűsödési" helyek száma)	3,71
Emelkedő járatok száma	3,71
Frekvencia terheltsége	3,71
Összetartó útvonalon haladó járatpárok száma	3,57
Süllyedő járatok száma	3,57
Nyitva lévő különleges légterek száma	3,57
Útvonalak keresztezési pontjainak száma	3,43
Használható magassági szintek száma	3,29
Műszaki berendezések állapota	3,14
Pilóták kéréseinek száma (pl. magasság, irány)	2,86
Járatok sebességének változatossága	2,57
Járatok egymáshoz viszonyított haladási iránya	2,29

Az 1. táblázatban látható tényezők közül néhány egyszerűen számszerűsíthető. A süllyedő légi járművek száma például egyértelműen meghatározható egy-egy szituációra és azt is feltételezhetjük, hogy ebben az esetben a nagyobb számérték jelent nagyobb munkaterhelést. Más tényezőknél ugyanakkor szükség van a jelentéstartalom definiálására és az ez alapján történő matematikai leírásra. Ilyen tényező például a potenciális konfliktusok száma, aminek számításához meg kell határozni, hogy két egymást keresztező útvonalon haladó repülőgépek mennyi idő elteltével és milyen időközrel kell az útvonalak keresztezési pontját elérni ahhoz, hogy konfliktusról beszélhessünk köztük. Egy másik, a számszerűsítés szempontjából érdekes tényező a légi járművek egymáshoz viszonyított haladási iránya és sebessége, vagyis a forgalom összetartó (vagy széttartó) jellegének mértéke. Ennek kiszámítása a (Delahaye & Puechmorel, 2000)-ban ismertett módszer segítségével történt.

A számszerűsítés szempontjából legkevésbé könnyen kezelhetőnek bizonyuló komplexitási tényező az időjárás volt. Ennek következtében a szektorkonfiguráció neurális hálós módszerrel történő becslhetőségének vizsgálata során

a korábbiakban nem vettük figyelembe, annak ellenére, hogy – ahogyan az 1. táblázatból is kiderül – ez a tényező tűnik a legfontosabbnak az irányítói munkaterhelés szempontjából. Ennek következtében a módszerrel nyert eredmények nem tekinthetők optimálisnak minden időjárási körülmény esetén.

A neurális hálós módszer segítségével nyerhető eredmények javításához tehát fontos lenne az időjárási tényezőket szerepeltetni a bemeneti paraméterek között. Ehhez első lépésben meg kell határozni azt, hogy pontosan milyen módos befolyásolja az időjárás a légiforgalmi irányítók munkaterhelését, majd azt, hogy az időjárás jellemzésére használható számszerű értékek milyen összefüggést mutatnak a munkaterheléssel. A 3. és 4. fejezetben ezzel a két kérdéssel foglalkozunk.

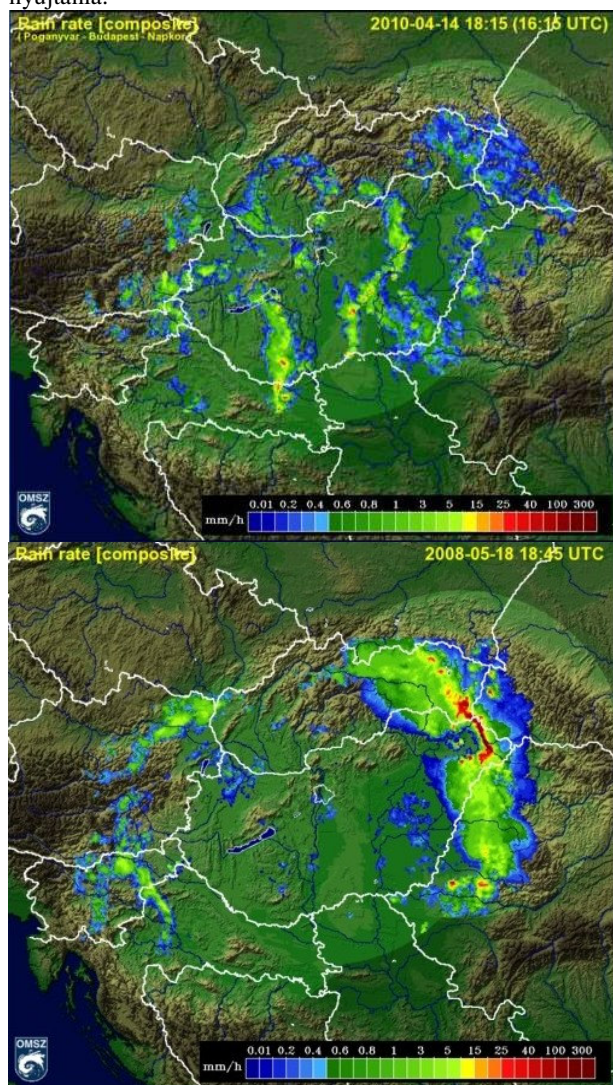
3. AZ IDŐJÁRÁS HATÁSA A LÉGIFORGALOMRA

Ahogyan az (Steierlein és Kardos, 2015)-ből is kiderül, a légi közlekedést leginkább befolyásolni képes időjárási tényezők közé sorolhatjuk a látási viszonyokat rontó tényezőket (pl. köd, eső, havazás stb.), a szelet és az olyan rendkívüli jelenségeket, mint a zivatar. A látási viszonyokat befolyásoló tényezők leginkább a repülőterek forgalmát kezelő toronyirányítás munkájára lehetnek hatással, mivel itt mind az irányítók, mind a légi jármű személyzetek esetében nagyobb jelentősége van a forgalomról való vizuális (nem műszeres) információszerezésnek, mint a bevezető és a körzeti irányítás esetében. Tekintve, hogy a neurális hálós szektorkonfiguráció előrebecslő módszert alapvetően a körzeti irányítás szektoraira tervezzük alkalmazni, a látási viszonyokat nem fontos komplexitási tényezőként figyelembe venni.

A szél a légi járművek mozgási jellemzőit (sebesség, haladási irány) befolyásolhatja, a hatásának kiküszöbölése pedig a légi jármű személyzetének a feladata, aminek végrehajtásához általában nincs szükség a légiforgalmi irányítás segítségére. A szél iránya és sebessége ugyanakkor meghatározó a repülőtereken használatban lévő futópályairányok szempontjából. Ennek megfelelően a szél alapvetően a toronyirányítás számára generálhat munkaterhelést, mivel az itt dolgozó operátorok feladata meghozni a futópályairánnyal kapcsolatos döntéseket. Az aktuálisan használt futópályairány fontos a bevezető irányítás szempontjából is, mivel ennek változása esetén más irányból kell az érkező repülőgépeket átadni a repülőteri irányításnak, illetve máshol kell felszálló repülőgépekre számítani. Az optimális szektorkonfiguráció becslésével foglalkozó kutatás esetleges későbbi – bevezető irányításra vonatkozó – kiterjesztése esetén tehát érdemes lehet figyelembe venni a szél irányát és sebességét, valamint ezek megváltozását (vagy azt, hogy melyik futópályairányok vannak használatban), mint komplexitási tényezőt, a jelenlegi, körzeti irányításra fókuszáló szakaszban azonban nincs jelentősége, mivel feltételezhetjük, hogy nincs hatással a körzeti irányítók munkájára.

Ahogyan az (Ahlstrom, 2005)-ben bemutatott felmérés eredményéből is kiderül, a bevezető- és körzeti irányítás

szempontjából leginkább jelentős időjárási tényező a zivatar. A zivatar által érintett légtérterületekben számos olyan jelenség figyelhető meg, amelyek külön-külön is veszélyt jelentenek a repülésre. Ezek közé sorolható a turbulencia, a repülőgép-szerkezet- és a hajtóművek jegesedése, a villámlás, a szélnyírás vagy a függőleges légáramlatok. Az áramlatok nem tehetnek kárt a repülőgépek szerkezetében, de a váratlan mozgás sérülésekhez vezethet a fedélzeten. A zivatar közelsége ezen felül a rádiókommunikációt is megnehezítheti. Ezen tényezők miatt a zivatarokat minden esetben el kell, hogy kerüljék a légi járművek, amiben légiforgalmi irányításnak értelemszerűen segítséget kell nyújtania.



1. ábra: Zivatar-tevékenység vizuális megjelenítése

A zivatar elhelyezkedésére vonatkozóan a pilótáknak és a légiforgalmi irányításnak is vannak információi, ezek megbízhatósága azonban eltérő. A budapesti ATC központ esetében a légiforgalmi irányítók számára közvetlenül rendelkezésre álló időjárási adatokat az Országos

Meteorológiai Szolgálat biztosítja és minden irányítói (valamint supervizori) munkaállomáson megjelennek (az 1. ábrán láthatóhoz hasonló formában). Ezek azonban nem előrejelzett adatok, hanem a megjelenítés időpontjához képest néhány perccel korábban megvalósult időjárás helyzetet tükröző történeti adatok. Mivel a légtér zivatarok által érintett része azok mozgása és méretbeli változása miatt rövid idő alatt is megváltozhat, ezért a megjelenített történeti időjárás adatok önmagukban nem teszik lehetővé az irányító számára, hogy pontos terveket készítsen a légi járművek esetlegesen módosított útvonalaira vonatkozóan. Arra ugyanakkor elengedő, hogy segítségükkel az irányító felkészülhessen arra, hogy a repülési tervük alapján a zivatar által érintett légtértartományon át, vagy annak közelében repülő légi járművek várhatóan útvonal módosításra vonatkozó kérésekkel fognak előállni.

A pilóták ezzel szemben általában valós időben tájékozódhatnak a repülőgép környezetében megfigyelhető különböző időjárás jelenségekről fejlett fedélzeti időjárás radarok segítségével. Ennek köszönhetően elképzelhető, hogy zivatar esetén hatékonyabb elkerülési tervet tudnak kidolgozni saját repülőgépeikre vonatkozóan, mint a légiforgalmi irányító, ennek során azonban nem tudják figyelembe venni a környezetükben lévő további forgalmat és az esetleges (nem időjárás miatt) korlátozott légtereket.

A zivatarkerülés végrehajtása tehát még más légiforgalmi irányítást érintő tevékenységeknél is több együttműködést igényel a légi jármű személyzete és az irányító között, mivel mindkét fél rendelkezik olyan információkkal, amelyekkel a másik nem. A zivatarkerülést a pontosabb rendelkezésre álló adatok miatt általában a pilóta kezdeményezi azzal, hogy a haladási irány és/vagy a magasság változtatására vonatkozó kérést intéz az irányítás felé az időjárásra hivatkozva. Az irányító ilyen esetben általában törekszik arra, hogy engedélyezze a kért változtatást, mivel feltételeznie kell, hogy a pilóta jobban ismeri a repülőgép útvonala mentén várható időjárást. Ugyanakkor az irányító elsődleges feladata az előírt vízszintes és függőleges elkülönítés biztosítása a légi járművek között, ezért csak akkor adhat bármilyen irány- vagy magasságváltoztatási engedélyt, ha ez várhatóan nem vezet az elkülönítési előírások megsértéséhez.

A légiforgalmi irányítóknak tehát zivatarkerülés miatti kérés esetén frissítenie kell a forgalmi helyzetről alkotott mentális képét részben a kérést leadó légi járműtől kapott időjárás információval (hol van zivatartevékenység az adott pillanatban), részben pedig azzal az útvonallal, amit a légi jármű a kérés engedélyezése esetén követni fog. Ezen felül, ha a légi jármű letérni kényszerül a repülési terv szerinti tervezett útvonaláról, akkor az arra való visszatérés elősegítése az irányító feladata a megfelelő irányra, magasságra és sebességre vonatkozó utasítások segítségével. Más szóval a zivatarkerülés miatt útvonalat módosító repülőgépre kiemelt figyelmet kell fordítania az irányítóknak egészen a kerülés sikeres befejezéséig. Mindez értelemszerűen növeli az irányító kognitív terhelését.

Természetesen ritkán fordul elő olyan szituáció, amikor a zivatar hatására csak egy légi jármű kényszerül útvonalának megváltoztatására. Jellemzőbbek az olyan helyzetek, amikor közel egy időben több repülőgép személyzete is zivatarkerülési kéréssel fordul az irányítás felé, aminek következtében az irányítóknak több különböző módosított útvonaltervet kell összehangolni. Ez gyakran csak úgy valósítható meg, hogy egy vagy több légi jármű nem a kérésében szereplő irány- vagy magasságmódosításra kap engedélyt. Az ilyen repülőgépek esetében arra is kiemelten kell figyelni, hogy valóban az irányító által adott utasítást hajlják-e végre. További probléma lehet, hogy mivel mind a zivatarkerülési tervek kidolgozása, mind pedig a kerülésre vonatkozó kérések feldolgozása időt igényel az irányító részéről, ezért előfordulhat, hogy egy kérésben szereplő irány- vagy magasságváltoztatási érték a kérés időpontjában még elég lett volna a zivatar tényleges elkerüléséhez, az engedély kiadásakor azonban már nem. Ilyen esetben az érintett légi jármű valószínűleg újabb kéréssel áll elő, ezért az irányítóknak továbbra is foglalkoznia kell vele.

Ahogy az az eddigiekből is kiderült, ha egy szektorban sok a zivatart kerülő repülőgép, akkor megnő az irányító és a pilóták közti üzenetváltások mennyisége. Ez a kommunikációs frekvencia túlterheltségéhez vezethet, ami miatt egyes kérések vagy utasítások nem juthatnak el időben az irányítóhoz vagy a személyzetekhez és emiatt érvényüket veszíthetik. Az ilyen esetekben értelemszerűen új kérésekre vagy új utasításokra van szükség, ezek pedig új tervek kidolgozását igénylik az irányító részéről, tovább növelve annak munkaterhelését. Szintén a megnövekedett kommunikációs forgalom következményeként állhat elő az a probléma, hogy az irányító az időegység alatt hozzá érkező nagyobb információmennyiség miatt figyelmen kívül hagy, félreért vagy rosszul értelmez egy kérést vagy egy utasítás visszaolvasását, aminek a későbbi korrekciója szintén munkaterhelés növekedést jelent.

Tovább nehezítheti a légiforgalmi irányítók feladatát ha a zivatar által érintett légtértartomány szektorhatár közelében helyezkedik el, mivel ebben az esetben egyszerre több szektor forgalmát is befolyásolhatja. Ilyen szituációban az érintett szektorok irányítóinak az általuk kezelt repülőgépek biztonságos zivatarkerülésének felügyelete mellett koordinálniuk kell a szomszédos szektor irányítójával is, hogy a kerülési terveiket összehangolhassák. A koordinációs tevékenység minden esetben hozzájárul az irányító munkaterheléséhez, mivel pedig a frekvencia magas terhelése miatt zivatar idején nehezebb végrehajtani, ezért ilyenkor az átlagosnál is nagyobb problémát okoz munkaterhelési szempontból.

4. AZ IDŐJÁRÁS FIGYELEMBE VÉTELE A SZEKTORKONFIGURÁCIÓ BECSLÉSE SORÁN

Ahogy az előző fejezetben is utaltunk rá, a szektorkonfiguráció neurális háló segítségével történő becslése során a légtérben előforduló lehetséges időjárás jelenségek közül elég a zivatartevékenység munkaterhelés generáló hatását figyelembe venni (ameddig a módszert csak

a körzeti irányításra vonatkozóan tervezzük alkalmazni). A zivatark hatását a módszerbe történő bevonására alapvetően kétféle megoldás kínálkozik, amelyeket részletesen a következő két alfejezetben mutatunk be.

4.1 Közvetett hatás figyelembe vétele

Az egyik lehetőség az, hogy nem közvetlenül a zivatart vesszük figyelembe, hanem annak a különböző egyéb komplexitási tényezőkre (pl. útvonalszerkezet komplexitása, konfliktusban lévő légi jármű-párok száma, kommunikáció mennyisége stb.) gyakorolt hatását. Más szóval a zivatar által befolyásolt tényezőkhöz rendelhető értékeket módosítjuk a zivatar feltételezett hatásának megfelelően.

Ezen módszer gyakorlati megvalósítása tulajdonképpen azt jelenti, hogy a számítások során felhasznált forgalmi szituációkban módosítjuk a repülőgépek útvonalait és/vagy repülési magasságait a zivatargócok elhelyezkedése alapján és az így előálló, módosított forgalmi szituációra vonatkozóan számítjuk ki a komplexitási tényezők értékét. A felvázolt módszer megvalósítását nehezíti az a tény, hogy – ahogyan az előző fejezetből is kiderül – a zivatarkerülés folyamata nem tekinthető determinisztikusnak, mivel bizonytalanság figyelhető meg többek között a zivatar észlelése és jelentése között eltelt időben (a pilóta részéről), a kérés fogadása és a kerülés megkezdése között eltelt időben (az irányítás részéről), valamint a kerülési útvonal elhelyezkedésében. Emiatt a módszer csak akkor alkalmazható, ha rendelkezésre áll egy olyan matematikai modell a zivatarkerülés folyamatának leírásához, amely képes az említett bizonytalanságokat figyelembe venni.

A zivatark hatása a légi járművek útvonalára és ezzel szoros összefüggésben a zivatarkerülési stratégiák leírása a légiforgalom szervezés (Air Traffic Management, ATM) fontos kérdése, aminek következtében számos korábbi kutatás foglalkozik a témával.

(McCrea *et al.*, 2008) a repülési terveknek a várható időjárás figyelembe vételével történő módosításának modellezésével foglalkozik. A modellben bizonyos előre jelzett időjárás adatok alapján a légtér egyes meghatározott földrajzi pontjaihoz hozzárendelik annak valószínűségét, hogy az adott pont felett zivatar lesz, a pontokat összekötő szakaszok mentén pedig lineáris interpolációval határozzák meg a valószínűségeket. Az így létrehozott valószínűségi hálózat után ráillesztik a repülőgépek tervezett útvonalaira és módosítják azokat úgy, hogy ne érintsék a légtér azon részeit, ahol a zivatar valószínűsége meghalad egy bizonyos értéket.

(Yoon *et al.*, 2012) a geometriai alapú zivatarkerülési modelljében figyelembe veszi annak a lehetőségét is, hogy a zivatar a kerülés végrehajtása közben (vagy még annak megkezdése előtt) eloszlik és a kerülést végző légi jármű visszatérhet az eredetileg tervezett (az úti céljának hatékony elérése szempontjából optimálisnak tekintett) útvonalára. Ennek megfelelően az optimális kerülési útvonalat a tervezett útvonal és a zivatarkerülés tényleges végrehajtásához szükséges módosított útvonal közé eső útvonalként

határozzák meg, a zivatar elmúlásáig hátralévő idő, mint valószínűségi változó figyelembe vételével. Mindkét felvázolt modell eredménye egyfajta módosított útvonal, amely az általunk vizsgált komplexitási tényezők közül befolyásolhatja az egymást keresztező útvonalon haladó légi jármű párok számát, valamint a légi járművek haladási irányának változatosságát és a forgalom térbeni eloszlásának egyenletességét.

(Tian *et al.*, 2015) szerint a zivatargócokat nagy kiterjedésű objektumokként lehet kezelni a légtérben, amelyekkel a repülőgépek ugyanúgy konfliktusba kerülhetnek, mint egymással. A légtérnek a zivatar által érintett részét korlátozott légtérként kezelik, amelyet hasonló biztonsági zóna vesz körül, mint a repülőgépeket a minimális vízszintes elkülönítés nagyságának megfelelő sugarú kör. Erre azért van szükség, mert a forduló vagy magasságváltoztatás időszükséglete miatt a kerülést a zivatargóctól egy meghatározott értéknél nagyobb távolságra kell elkezdni. Ezen modell alapján tehát a zivatar a légtérben lévő konfliktusok számát növeli, vagyis a neurális hálós modellben az ennek megfelelő komplexitási tényező értékét kellene változtatni zivatar esetén.

4.2 Időjárás jelenségek számszerűsítése

A másik módszer az időjárás figyelembe vételére az, ha azt közvetlen munkaterhelést befolyásoló tényezőnek tekintjük és a többi tényezőhöz hasonlóan számszerűsítjük. Ennek megvalósítása azonban – ahogyan a 2. fejezetben is említettük – nem egyértelmű. Egy adott légiforgalmi irányítási szektorban jelen lévő zivatartevékenységhez többféle számérték is rendelhető, például az alábbiak:

- 0 vagy 1 aszerint, hogy megfigyelhető-e zivatartevékenység a szektorban vagy nem,
- A zivatargócok száma,
- A zivatargócok átlagos intenzitása,
- A legnagyobb intenzitású zivatargóc intenzitása,
- A zivatargócok által lefedett földrajzi terület nagysága,
- A zivatargócok által érintett szabványos magassági szintek száma,
- A zivatargócok által érintett légtértartomány nagysága (a lefedett földrajzi terület és az érintett magassági szintek szorzata),
- A lefedett földrajzi terület nagyságának aránya a szektor alapterületéhez viszonyítva,
- Az érintett magassági szintek aránya az összes magassági szinthez viszonyítva,
- A zivatargócok legkisebb távolsága a szektorhatártól,
- A zivatargócok átlagos távolsága a szektorhatártól,
- A zivatargócok legkisebb távolsága egymástól,
- A zivatargócok átlagos távolsága egymástól.

A felsorolt mennyiségek az adott szektorra vonatkozó időjárás adatok alapján kiszámíthatóak, bár néhány mennyiségnél előbb szükség lehet a jelentéstartalom pontos

meghatározására. Az intenzitás esetében például el kell dönteni, hogy az adott zivatargócon belüli legnagyobb intenzitású tartomány intenzitását vesszük figyelembe vagy az átlagos intenzitást, a távolságok számításánál pedig azt, hogy a zivatargóc határát vagy középpontját vesszük a számítás alapjául.

A neurális háló bemeneti paraméterei között figyelembe vehetnénk az összes ismertett mennyiséget, ez azonban elképzelhető, hogy szükségtelenül növelné a háló összetettségét, ami pedig az eredmények pontosságának romlásához vezethet. Emiatt a mennyiségeknek a szektorkonfiguráció becslésre használt módszerbe való bevonása előtt érdemes információt szerezni azok fontosságáról. Ezen információ legkézenfekvőbb forrásai az aktív légiforgalmi irányítók lehetnek.

A mennyiségek irányítói vélemények alapján történő súlyozásának egyik lehetséges módja, ha a 2. fejezetben felsorolt komplexitási tényezőkhöz hasonlóan ezekkel kapcsolatban is kérdőívet állítunk össze, amelyben megkérjük az irányítókat, hogy saját tapasztalataik és elképzeléseik alapján értékeljék a zivatark különböző jellemzőinek munkaterhelés növelő hatását. Ezen módszer megvalósítása egyszerű ugyan, az eredményei azonban nem biztos, hogy megbízhatóak lesznek. Ennek oka, hogy az időjárás munkaterhelés növelő hatását a felsorolt tényezők együtt idézik elő és kicsi a valószínűsége, hogy az irányító meg tudja állapítani, melyik tényező mekkora szerepet játszik ebben.

A kérdőíves módszer helyett célravezetőbb lehet, ha az irányítók számára vizuálisan megjelenítünk különböző légiforgalmi szituációkat, amelyek zivatargócokat is tartalmaznak és megkérjük őket, hogy értékeljék ezeket aszerint, hogy mekkora munkaterhelést jelentene számukra ezek kezelése, illetve mennyivel lenne nagyobb a munkaterhelés annál, amit az adott szituáció zivatar nélkül okozna. A szituációk munkaterhelés szerinti értékelése történhet számértékek segítségével (pl. 1-től 5-ig vagy 1-től 10-ig terjedő skálán) vagy „fuzzy” fogalmak használatával (pl. kicsi, közepes vagy nagy terhelés).

Ahhoz, hogy értékelhessük a zivatar különböző jellemzőinek hatását, fontos, hogy a bemutatott forgalmi szituációk között legyenek olyanok, amelyek a repülőgépek tervezett útvonalait tekintve egyformák és csak a zivatargócok jellemzőiben térnek el egymástól. Annak érdekében pedig, hogy az irányítói vélemények szubjektivitásának torzító hatását csökkentsük, érdemes ugyanazokat a szituációkat több irányítónak is megmutatni.

A felvázolt felmérés eredményeként előállhat néhány olyan, zivatarral sújtott forgalmi szituáció, amelyre vonatkozóan van információnk arról, hogy mekkora munkaterhelést idéz elő a benne megjelenő zivatar. Ezután meg kell állapítani az összefüggést a munkaterhelés értékek és a zivatark leírására használható tényezők között. Ez hasonló feladat, mint a komplexitási tényezők és az optimális szektorkonfiguráció

közi összefüggés feltárása, vagyis ennek a megoldásához is érdemes neurális hálót használni.

A neurális háló bemeneti rétegének neuronjaihoz hozzárendelhetjük a korábban felsorolt, zivatark jellemzésére használható mennyiségeket, amelyek halmazát azonban érdemes előbb bővíteni esetleges további tényezőkkel, amit gyakorló irányítókkal folytatott konzultáció alapján hajthatunk végre. Ehhez kapcsolódóan fontos megjegyezni, hogy a felsorolt tényezők nagy része is irányítókkal folytatott beszélgetések eredményeként került a lehetséges tényezők közé. A háló kimeneti rétegét egy neuron alkotná, amely az adott jellemzőkkel rendelkező zivatar által előidézett extra munkaterhelésnek felel meg. A neurális hálónak az előbbieken alapján történő megtervezését követően lehetségessé válik annak tanítása, aminek eredményeként megállapítható, hogy a különböző zivatarjellemtől közl melyik milyen súllyal vesz részt a munkaterhelés alakításában. Az így kapott eredmények validálása érdekében megvizsgálhatjuk azt is, mennyire tér el a betanított neurális háló kimenetén megjelenő munkaterhelés érték az irányítók véleménye alapján elvárttól néhány olyan szituációra vonatkozóan, amelyeket nem használtunk fel a tanítás során.

Ha az eddigiekben bemutatott módszerrel előállítottuk a zivatarjellemtől fontosságát jelképező súlyszámokat, akkor ezek alapján el kell döntenünk, melyek azok a tényezők, amelyek elég fontosak ahhoz, hogy komplexitási tényezőként figyelembe vegyük őket a szektorkonfiguráció becslése során és melyek azok, amelyeket elhanyagolhatunk. Ezt követően ezen új információ felhasználásával újra végre kell hajtani a 2. fejezetben ismertetett lépéssorozatot annak érdekében, hogy egy, a szektorkonfigurációt a korábbinál pontosabban előrebecsülni képes neurális hálót kapjunk.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A különféle időjárás jelenségek – különösen a zivatartevékenység – nagymértékben befolyásolják a légiforgalom jellemzőit és ezen keresztül a légiforgalmi irányítók munkaterhelését. Emiatt elengedhetetlen, hogy a légtérben uralkodó időjárás körülményeket figyelembe vegyük a légiforgalmi irányításban használt optimális szektorkonfiguráció munkaterhelés alapján történő becslése során.

Az időjárás hatásait figyelembe vehetjük úgy, hogy eszerint módosítjuk más komplexitási tényezők értékeit vagy úgy, hogy a komplexitási tényezőkhöz hasonlóan a zivatarkat leíró számszerű tényezők fontosságáról is felmérést készítünk. Előbbi módszer gyakorlati végrehajtásához ki kell választani (vagy létre kell hozni) egy olyan matematikai modellt, amellyel leírható a forgalom jellemzőinek (pl. a várható repülési útvonalaknak) megváltozása a zivatargócok megjelenésének hatására. A második módszer alkalmazásához különféle mesterséges forgalmi szituációkat kell kidolgozni és megjeleníteni, amelyekben zivatargócok is találhatóak. Ennek során ügyelni kell arra, hogy a megjelenített szituációk a megkérdezettek számára könnyen értelmezhetőek legyenek és hogy a zivatark jellemzésére

használható minden változó hatását felfedjék. A megvalósítás tehát ebben az esetben erőforrás-igényesebb, de a módszer segítségével az időjárás közvetlenül, önálló komplexitási tényezőként vehető figyelembe.

HIVATKOZÁSOK

- Ahlstrom, U. (2005). Work domain analysis for air traffic controller weather displays. *Journal of Safety Research*, **36**, 159-169.
- Delahaye, D. és Puechmorel, S. 2000. Air traffic complexity: towards intrinsic metrics. *Proceedings of the third USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar*, Naples, Italy
- Gianazza, D. és Guittet, K. (2006). 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*, Belgrade, Serbia and Montenegro
- Majumdar, A., Ochieng, W. Y., McAuley, G., Lenzi, J. M., Lepadetu, C. (2005). The factors affecting airspace capacity in europe: A framework methodology based on cross sectional time-series analysis using simulated controller workload data. *Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar*
- Masalonis, A. J., Callahan, M. B. and Wanke, C. R. (2003). Dynamic density and complexity metrics for realtime traffic flow management. *Proceedings of the 5th USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar*, Budapest, Hungary
- McCrea, M.V., Sherali, H.D. és Trani, A.A. (2008). A probabilistic framework for weather-based rerouting and delay estimations within an Airspace Planning model. *Transportation Research Part C*, **16**, 410-431.
- Rodgers, M.D., Mogford, R.H. és Mogford, L.S. (1998). The relationship of sector characteristics to operational errors. *FAA Aviation Medicine Report*, **98/14**
- Stager, P. és Hameluck, D. (1990). Ergonomics in air traffic control. *Ergonomics*, **33(4)**, 493-499.
- Steierlein Á. és Kardos P. (2015). A leszállási előrejelzés verifikációja. *Repüléstudományi Közlemények*, **27(2)**, 70-89.
- Számel B., Mudra I. és Szabó G. (2015). Applying Airspace Capacity Estimation Models to the Airspace of Hungary. *Periodica Polytechnica: Transportation Engineering*, **43(3)**, 120-128.
- Yoon, Y., Hansen, M. és Ball, M.O. (2012). Optimal route decision with a geometric ground-airborne hybrid model under weather uncertainty. *Transportation Research Part E*, **48**, 34-49.
- Tian, Y., Wan, L., Chen, C. és Yang, Y. (2015). Safety assessment method of performance-based navigation airspace planning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (Megjelenés alatt)

