

Tapasztalati úton meghatározott légi járműszám alapú és komplexitás alapján matematikai módszerrel számított szektorkapacitás értékek korrelációjának vizsgálata

Számel Bence*, Dr. 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)

Absztrakt: A légiforgalmi irányítók munkaterhelése alapvető fontossággal bír a légi közlekedés biztonságában és hatékonyságában, mivel közvetett módon ez határozza meg a légterek kapacitását. A munkaterhelés és az azzal szorosan összefüggő optimális szektorkonfiguráció becslése a hazai ATC rendszerben jelenleg a szektorokba belépő repülőgépek száma alapján történik, de ugyanerre a célra léteznek a forgalom komplexitásán alapuló módszerek is. Tanulmányunkban azt vizsgáljuk, hogy a repülőgépszám alapú módszerrel összehasonlítva mennyire szolgáltattak megbízható eredményeket (illetve mennyivel nyújt többet) egy, a komplexitásra alapozott neurális hálós eljárás, valamint az ennek validálásához alapul szolgáló supervisor vélemény. Az eredmények közti összefüggés vizsgálata mellett arra is kitérünk, hogyan lehet a különböző módszerekkel előállított optimális szektorállapotok alapján szektorkonfigurációkat létrehozni.

1. BEVEZETÉS

A légi közlekedés biztonsága (vagy repülésbiztonság) Rohács & Horváth, 2013 definíciója szerint a levegőben történő mozgás során, a komplex emberi és műszaki tevékenység eredményeként létrejött, az adott körülmények között optimális működőképesség, illetve e működőképesség megtartásának valószínűsége. A légi közlekedés biztonságát egyaránt befolyásolják az abban részt vevő műszaki rendszerek, emberek és az ezek működését befolyásoló környezeti tényezők. Összetett jellegéből fakadóan a légi közlekedés biztonságának elemzése és fejlesztése többféle lehetséges megközelítés alapján történhet. Ezen megközelítések közé sorolható például a repülőgépek vagy légiforgalmi áramlatok mozgásának modellezése és/vagy szimulációja (pl. Péter & Szabó, 2012, Sztrunga, 2013 vagy Skorupski, 2010), a fedélzeti vagy légiforgalmi irányítási automatika és humán operátorok viselkedésének modellezése és szimulációja (pl. Inoue *et al.*, 2010 vagy Yemelyanov, 2009), a tervezés, megvalósítás és üzemeltetés hatásainak elemzése a műszaki rendszerek megbízhatóságára vagy a szabályozás, képzés és munkakörnyezet hatásának elemzése a humán összetevőkre (pl. Martinie *et al.*, 2010).

Jelenleg folyó kutatásunk célja annak feltárása, hogyan befolyásolják a légiforgalom különböző jellemzői a légiforgalmi irányítók munkaterhelését és ezen keresztül a légi közlekedés biztonságát. További célunk a feltárt összefüggésekre alapozva egyszerűen használható és automatizálható, de megbízható módszer kifejlesztése a légiforgalmi irányítók optimális számának meghatározására a forgalmi komplexitás következő időszakra prediktált értékei alapján. Jelen írásunkban azt vizsgáljuk meg, hogy a

komplexitást leíró tényezők alapján matematikai módszerrel (neurális hálós számításokkal) előállított szektorszámok milyen összefüggést mutatnak a HungarControl által jelenleg használt, a szektorokba belépő repülőgépek számán alapuló módszerrel számított szektorszámokkal ugyanazon forgalmi szituációkra vonatkozóan.

A 2. fejezetben röviden ismertetjük, milyen szerepe van a humán operátoroknak a légiforgalmi irányítás és ezáltal a légi közlekedés biztonságában, valamint, hogy hogyan javítható a biztonság fejlett szektorkapacitás számítási eljárások használatával. A 3. fejezetben bemutatunk egy módszert arra, hogyan lehetséges neurális hálós modell segítségével meghatározni a légiforgalmi irányítási szektorok optimális állapotát különböző forgalmi szituációkban, kitérve a módszer ismert hibáira és azok kiküszöbölésének lehetőségeire. A 4. fejezetben azzal foglalkozunk, hogyan lehetséges az optimálisnak vélt szektorszám (illetve szektorkonfiguráció) meghatározása a repülőgépszám alapú és a 3. fejezetben ismertetett módszer segítségével, majd az 5. fejezetben megvizsgáljuk, milyen korrelációt mutatnak ezen értékek egymással és a légiforgalmi irányítási szakemberek által javasolt értékekkel. Végül a 6. fejezetben összefoglaljuk a vizsgálat eredményeit és az ezek által felvetett jövőbeni tennivalókat.

2. AZ EMBEREK SZEREPE AZ ATC RENDSZER BIZTONSÁGÁBAN

A légi közlekedés biztonságában kulcsszerepe van a légiforgalom szervezési (ATM) és azon belül a légiforgalmi irányítási (ATC) rendszernek. Az ATC rendszert különböző műszaki összetevők (pl. radarok, kommunikációs berendezések, kijelzők, adatbázisok stb.) és emberi összetevők

(pl. légiforgalmi irányítók és a munkájukat koordináló supervisorok) alkotják. A rendszer és ezen keresztül a légiforgalom biztonságát a műszaki és a humán rendszerek együttes megbízhatósága határozza meg.

A technikai rendszerek hatását a rendszer biztonságára napjainkban aránylag egyszerűen meg lehet határozni, köszönhetően az elmúlt évtizedekben kifejlesztett biztonság-, megbízhatóság- és kockázatelemzési módszereknek. A műszaki rendszerek általában egyértelműen felbonthatóak olyan komponensekre, melyeknek jól definiált bemenetei, kimenetei és funkciói vannak. Ennek köszönhetően lehetőség van a lehetséges meghibásodások azonosítására és az olyan hagyományos biztonságelemzési eljárások használatára, mint például a hibamód és -hatás elemzés. Az emberi megbízhatóság elemzésére ugyanakkor nem állnak rendelkezésre ennyire kiforrott módszerek. Az emberi viselkedést számos olyan tényező befolyásolja, ami a pszichológia, az orvostudomány vagy a társadalomtudomány tárgykörébe tartozik és formális módszerekkel nem, vagy csak nehezen leírható. Emiatt a biztonságkritikus rendszereket felügyelő operátorok (például légiforgalmi irányítók) viselkedése nehezen becsülhető előre, ami miatt nem használhatóak rájuk a biztonságelemzés hagyományos módszerei.

Mindez azonban nem jelenti azt, hogy nem vonhatóak bizonyos párhuzamok az emberek és műszaki rendszerek biztonságra gyakorolt hatásának elemzési módszerei között. Lehetséges ugyanis az operátori tevékenységet is felbontani bizonyos funkcionális egységekre. Ezek az egységek nem mások, mint a külső szemlélő számára is érzékelhető makroszkopikus tevékenységek, amik pedig a kognitív szinten végbe menő mikroszkopikus tevékenységekből állnak elő. Makroszkopikus tevékenység lehet például a légiforgalmi irányítók esetében a forgalom látott és hallott információk alapján történő figyelése vagy az ez alapján történő utasításadás a repülőgépeknek. A makrotevékenységek feltárása lehetővé teszi az emberi hibák lehetséges „megjelenési felületeinek” azonosítását, de nem teszi lehetővé a hibák elemzését, ami inkább a mikroszkopikus tevékenységek szintjén lenne lehetséges.

Bár az operátorok mikroszkopikus információfeldolgozó tevékenységének modellezése nem egyszerű, a múltban több módszert is kidolgoztak erre. Ezek közé tartozik többek között Wickens, 1992 információ feldolgozási modellje, az SLM („létra”) modell (Rasmussen, 1986), a GEMS (Generic Error Modelling System) modell (Reason, 1987), Hollnagel, 1993 „Egyszerű kognitív modell”-je vagy Endsley, 1999 helyzetfelismerési modellje. A rendszerbiztonság javításának érdekében történő emberi viselkedés vagy hibaelemzés során azonban általában nem elég csak azt feltárni, hogy hol és milyen jellegű hiba lépett fel az emberi kognitív tevékenységekben (pl. a fenti módszerek valamelyikével). Az emberi hibák esetében ugyanis ritkán fordul elő, hogy az egyetlen ok az információfeldolgozás folyamatában van, mivel az emberi viselkedést mindig befolyásolják bizonyos környezeti hatások, melyeket gyűjtőnéven viselkedést

befolyásoló tényezőnek (Performance Shaping Factor, PSF) szoktak nevezni. PSF-ek lehetnek az operátor állapotából, a hardveres-, szervezeti- vagy társadalmi környezetből eredő hatások. A PSF-ek osztályozására Blackman *et al.*, 2008-ban láthatunk példát.

A biztonságkritikus rendszerek operátorainak estében az egyik legfontosabbnak tartott PSF a munkaterhelés, ahogyan az például Strenzke & Schulte, 2011 operátori viselkedésmo­del­ljében is látható. A légiforgalmi irányítók esetében a munkaterhelés a Flynn *et al.*, 2005) által megadott definíció szerint az az idő, amit az irányító egy adott időintervallumon (pl. 1 órán) belül a légiforgalom irányításához közvetlenül kapcsolódó tevékenységekre (információgyűjtés, szituációk értelmezése, tervek kidolgozása és végrehajtása) fordít. A definíció alapján a munkaterhelés megadható abszolút értékekkel (pl. percben) vagy a vizsgált intervallum hosszához viszonyított százalékos értékkel.

A munkaterhelés jelentősége az ATC rendszerekben talán még nagyobb, mint más biztonságkritikus területeken. Ennek oka az, hogy a légi közlekedési rendszer kapacitását szinte minden légtérben az ATC rendszer kapacitása határozza meg. Az ATC rendszer kapacitása alatt azt a forgalmat kell érteni, amit a légiforgalmi irányítók még biztonságosan tudnak kezelni, a biztonságos kezelhetőség pedig a forgalom által generált munkaterheléstől függ. A nagyobb forgalom nagyobb munkaterheléshez vezet és bár vannak, akik máshogyan gondolják (Stager & Hameluck, 1990), feltételezhetjük, hogy a magasabb munkaterhelés gyakoribb és súlyosabb hibákhoz vezet az irányítók részéről. Mindez azt is jelenti, hogy amennyiben ki tudjuk számítani egy adott légiforgalmi szituáció munkaterhelést növelő jellemzőit, akkor azt is meg tudjuk állapítani, hogy az adott szituációt képes-e kezelni az ATC rendszer anélkül, hogy az irányítók munkaterhelése túlzottan magas szintre kerülne. Másképpen fogalmazva, általában lehetséges meghatározni azt, hogy egy bizonyos forgalmi szituáció biztonságos és hatékony kezeléséhez hány légiforgalmi irányító (vagy szektor, ill. milyen szektorkombináció) lenne optimális.

Fontos megjegyezni, hogy amikor forgalomnagyságról (vagy nagy forgalomról) beszélünk, az alatt ezúttal nem egyszerűen a forgalmat alkotó repülőgépek számát kell érteni. A forgalomnagyság jelen kontextusban inkább azt fejezi ki, mekkora nehézséget jelent az irányítás számára az adott forgalom kezelése, amit a repülőgépek száma mellett a forgalom és a légtér komplexitása is befolyásol.

A komplexitást számos különböző tényezővel lehetséges leírni (pl. magasságot váltó járatok száma, forgalom széttartó vagy összetartó jellege, irányítók és pilóták közti kommunikáció mennyisége, szektorok kiterjedése, különleges légterek száma stb.), melyek egy része a várható forgalom adatai alapján előre becsülhető. Ha emellett ismerjük az összefüggést a komplexitás és a munkaterhelés között (ami például a 3. fejezetben bemutatott neurális hálós módszerrel állapítható meg), akkor a várható komplexitásértékek alapján lehetségessé válhat a jövőben várható forgalom biztonságos és

hatékony kezeléséhez szükséges ideális szektorszám meghatározása, illetve ennek részbeni automatizálása, ami megkönnyítheti a szektorszámokkal kapcsolatos döntéseket meghozó supervisorok munkáját.

3. MÓDSZER AZ OPTIMÁLIS SEKTORÁLLAPOT MEGHATÁROZÁSÁRA

Egy ATC szektornak a használatban lévő szektorkonfigurációtól függően háromféle állapota lehet. Össze lehet vonva egy másik szektorral („merged” állapot), fel lehet osztva több szektorra („split” állapot) vagy önállóan lehet használatban („armed” állapot). Azokat a szektorokat, melyeket nem lehetséges tovább osztani, a továbbiakban elemi szektoroknak nevezzük, míg azokra, amelyeket osztani és összevonni is lehet, légtérblokkokként hivatkozunk. Az optimális szektorállapot meghatározását a Gianazza & Guittet, 2006 által leírt neurális hálós módszerrel végeztük a hazai légtér jellegzetességeinek figyelembe vételével. Mindez magában foglalja a magyarországi légtérben leginkább jelentős komplexitási tényezők halmazának meghatározását, valamint ezen komplexitási tényezők alapján a megfelelő neurális hálók tervezését, tanítását és eredményeik kiértékelését.

3.1 A felhasznált komplexitási tényezők meghatározása

Az optimális szektorállapot becslésére alkalmas neurális háló létrehozásához első lépésben meg kell határozni, melyek legyenek azok a komplexitási tényezők, amelyeket a hálóban bemeneti paraméterként figyelembe fogunk venni. A komplexitási tényezők halmazának meghatározását három lépésben végeztük el, elsősorban légiforgalmi irányítással foglalkozó szakemberek véleménye alapján.

Az első lépés nem volt más, mint egy személyes interjú egy korábban légiforgalmi irányítással, jelenleg pedig annak szervezésével foglalkozó szakemberrel. Az interjú célja az volt, hogy információt szerezzünk a magyar légtér és az abban lebonyolódó légi forgalom sajátosságairól. Az interjúalanyunk azt kellett elmondania, mely komplexitási tényezők azok, amik a magyar légtérben dolgozó légiforgalmi irányítók munkáját a legnagyobb mértékben befolyásolhatják. Az interjú alapján a komplexitási tényezőknél viszonylag tág halmaza állt rendelkezésünkre, amit a második és harmadik lépésben igyekeztünk szűkíteni.

A második lépésben bővítettük a megkérdezettek körét az által, hogy aktív légiforgalmi irányítókat és supervisorokat vontunk be az adatgyűjtésbe. A megkérdezetteknek ezúttal egy kérdőív keretein belül kellett értékelniük az első lépésben összegyűjtött komplexitási tényezőket aszerint, hogy azokat mennyire tekintik fontosnak a saját munkaterhelésük szempontjából.

A harmadik lépéssel az volt a célunk, hogy a rendelkezésünkre álló halmazból kiválasszuk azokat a komplexitási tényezőket, amiket ténylegesen használni fogunk a neurális hálók tervezésekor. A szűkítésre azért volt szükség, mert mind a neurális háló tanításának, mind pedig egy a háló logikáján alapuló esetleges döntéstámogató szoftver performanciájának

szempontjából fontos, hogy a bemenő paraméterek száma a lehető legkisebb legyen.

A kiválasztás során két fő szempontot vettünk figyelembe. Az egyik értelemszerűen a második lépésben használt kérdőív eredménye volt. Igyekeztünk elhanyagolni azokat a tényezőket, amelyek alacsony értékelést kaptak, a tényezők többségét azonban az irányítók és supervisorok nagy fontosságúnak ítélték, ami arra utal, hogy az első lépésben gyűjtött tényezők a légiforgalmi irányítási szakemberek általános véleményét is jól reprezentálják. A másik fontos szempont a tényezőknek a neurális hálós modellben történő gyakorlati felhasználhatósága volt. Ehhez egyfelől az kellett, hogy az egyes tényezők értéke könnyen (további nagy volumenű kutatómunka nélkül) számszerűsíthető legyen. Másfelől szükség volt arra, hogy a tényezők értéke a rendelkezésünkre álló historikus légiforgalmi adatok alapján számítható legyen és ne térjen el nagymértékben attól, amit az adott forgalmi szituációk kialakulását megelőző időszakban tervadatok alapján számíthattunk volna ki.

A gyakorlati felhasználhatósági szempont egyik nagy hátulütője az volt, hogy emiatt kellett kivenni a felhasznált komplexitási tényezők halmazából az időjárást és a légijárművekkel folytatott kommunikáció mennyiségét, miközben a kérdőív eredményei alapján ez a két tényező a legsúlyosabbak közé tartozott. Mivel nehezen elképzelhető, hogy egy, a gyakorlatban használt automatizált döntéstámogató segédeszköz ne vegyen figyelembe ennyire fontosnak tartott tényezőket, ezért a jövőben mindenképpen foglalkozni kell ezek matematikai leírásának lehetőségeivel.

Ennek egyik módja lehet az időjárás esetében a zivatartevékenység által érintett légtérsekcikók különleges légtérként történő kezelése vagy az időjárási jelenségeket leíró mérhető változók használata. Utóbbiak lehetnek például a Liu *et al.*, 2014 által is használt változók, azaz a felhőalap, a látótávolság, a szél sebessége és iránya, valamint a zivatar és a hó jelenléte. A kommunikációt szintén lehetséges számszerűsíteni, például a légiforgalmi irányítók és a repülőgépek személyzete (vagy más légiforgalmi irányítók) között végbemenő üzenetváltások számával vagy azok átlagos hosszúságával. Ezzel kapcsolatban azonban érdemes figyelembe venni, hogy – ahogyan az Rodriguez Uclés & García, 2014 alapján is látható – a különböző jellegű üzenetváltások különböző kapcsolatot mutatnak a munkaterheléssel, vagyis csak azokat érdemes a modellbe bevonni, amelyekről felételezzük, hogy munkaterhelésnövelő hatásúak.

3.2 A neurális hálós szimuláció és eredményei

Ahogyan már említettük, a komplexitási tényezőkre azért volt szükség, hogy bemeneti paraméterekként szolgáljanak azokhoz a neurális hálókhoz, amelyek képesek egy adott légiforgalmi szituáció komplexitási értékei alapján becslést adni arra, hogy a különböző szektoroknak az adott szituációban mi lenne az ideális állapota. Az ilyen neurális hálók kimeneti rétegén az adott szektor lehetséges állapotainak megfelelő számú neuron van, amelyek közül elméletileg

mindig az vesz fel 1 értéket, amely az adott szituációban ideális állapotnak felel meg, a többi pedig 0-t. Mivel a különböző szektortípusok (légtér, elemi szektorok, légtérblokkok) különböző lehetséges állapotokat vehetnek fel (a légtérrel nem lehet összevonni, az elemi szektorokat pedig osztani), ezért mindegyikhez külön neurális hálót terveztünk.

A hálók tanításához és eredményeik validálásához összesen 107 légitársasági szituáció adatait használtuk fel. A tanításhoz természetesen szükségünk volt megbízható adatokra arra vonatkozóan, hogy mi lenne az ideális szektorkonfiguráció egyes forgalmi szituációkhoz. Az erre vonatkozó információkat úgy szereztük be, hogy a szituációk radarképét megmutattuk néhány aktív supervisornak, akiktől azt kértük, hogy a forgalom komplexitását is figyelembe véve mondják el, hány irányítót (szektort) osztanának be az adott forgalom kezelésére. A hálók bemeneti rétegén 17 féle komplexitási tényező értékei szerepeltek. A hálók által szolgáltatott eredményeket az alapján értékeltük, hogy az eseteknek hány százalékában szolgáltatták egy adott szektorállapottal kapcsolatban azt az eredményt, amit a supervisor vélemények alapján vártunk. Az eredmények pontosságát a különböző szektortípusokra és állapotokra vonatkozóan az 1. Táblázat mutatja be. A „Validálási adatok” oszlop azt mutatja, hogy a kimeneti értékek ellenőrzését a háló számára addig ismeretlen lekérdezési adatokkal (Q) vagy a tanítás során már felhasznált adatokkal (T) végeztük.

1. Táblázat A neurális hálós módszer által szolgáltatott szektorállapotok pontossága

Szektortípus	Validálási adatok	Összes (%)	Split (%)
Légtér	Q	100	100
Légtér	T	100	100
Elemi	Q	96,5	-
Elemi	T	97,8	-
Blokk	Q	57,2	69,9
Blokk	T	72,2	88,5
W & E Blokk	Q	95,2	100
W & E Blokk	T	97,7	100
Szektortípus	Validálási adatok	Armed (%)	Merged (%)
Légtér	Q	100	-
Légtér	T	100	-
Elemi	Q	56,3	99,5
Elemi	T	81,8	99
Blokk	Q	4,6	59,7
Blokk	T	8,1	77,7
W & E Blokk	Q	91,7	83,3
W & E Blokk	T	92,1	100

Az 1. Táblázat alapján látható, hogy míg a háló a teljes légtérre és az elemi szektorokra (azaz a két lehetséges állapotú szektortípusokra) megbízható eredményeket ad, addig a

légtérblokkok esetén a pontossága lényegesen rosszabb, különösen az „armed” állapot megállapítása esetén. Ennek egyik oka a légtérblokkok felépítésének heterogén jellege lehet, amit az is alátámaszt, hogy a csak az egyaránt 5 elemi szektorból álló W és E légtérblokkhoz tervezett háló jóval pontosabb. A pontosság javítására több lehetséges módszer is kínálkozik. Ilyen például a heterogenitás hatásának csökkentése a légtérblokkok kisebb, hasonló felépítésű csoportjainak létrehozásával vagy a szektorszerkezetnek a komplexitási tényezőkben történő pontosabb figyelembe vételével. Szintén elképzelhető, hogy javítaná a pontosságot valamely, a felhasználnál fejlettebb neurális háló tervező szoftver használata, ami lehetőséget adna a háló belső logikájának módosítására is. Ezen kívül lehetne vizsgálni más matematikai alapú szektorkapacitás számítási módszerek alkalmazhatóságát is, ahogyan az például Számel & Szabó, 2014-ben történt.

4. OPTIMÁLIS SZEKTORKONFIGURÁCIÓ MEGHATÁROZÁSA

A tapasztalati úton meghatározott, a szektorokba belépő légitársaságok számára alapozott módszerre és a 3. fejezetben ismertetett neurális hálós eljárásra is igaz, hogy eredményei önmagukban nem adják meg az adott forgalmi szituációban optimális szektorszámot vagy szektorkonfigurációt, hanem csak a szektorok optimális állapotáról szolgáltatnak információt. Emiatt mindkét módszer használata esetén szükség van ennek kiszámítására valamilyen algoritmus felhasználásával.

4.1 Belépő légitársaságon alapuló módszer

Az adott forgalmi szituációhoz leginkább illeszkedő szektorkonfiguráció meghatározása a magyar légtérben jelenleg olyan módszerrel történik, amelynek alapját a szektorok repülőgépszámban megadott kapacitás értékei képezik. A különböző szektorok kapacitása alatt az adott szektorba a következő 20 percen várhatóan belépő repülőgépek maximális (megengedhetetlenül magas munkaterheléshez még nem vezető) számát kell érteni. Egy szektorkonfiguráció értelemszerűen akkor elfogadható biztonsági szempontból, ha nincs benne olyan önállóan használt szektor, amelybe 20 perc alatt a kapacitásánál több repülőgép lép be.

Az optimális szektorkonfigurációnak a belépő repülőgépek száma alapján történő meghatározása során két dolog jelentett problémát. Az egyik az volt, hogy az általunk vizsgált forgalmi szituációkra vonatkozó történeti adatok nem tartalmaztak információt arról, hogy mennyi az egyes szituációkban a következő 20 percen várható belépő repülőgépszám. Ennek megoldása érdekében minden forgalmi szituációhoz vettünk egy 20 perccel későbbi forgalmi mintát a rendelkezésünkre álló adathalmazból. Ezután megvizsgáltuk, hogy a 20 perccel későbbi szituációkban hány új repülőgép jelent meg az egyes szektorokban az eredeti állapothoz képest. Ha élünk azzal a feltételezéssel, hogy a 20 perces intervallumokban pontosan azok a repülőgépek léptek be a szektorokba, amelyek belépését előzetesen is feltételezték a repülési terv adatok alapján, akkor

az új repülőgépek száma megadja a belépő repülőgépek számát, amit összehasonlíthatunk a deklarált kapacitásértékekkel.

A másik problémát az jelentette, hogy nincs pontosan definiált eljárás arra vonatkozóan, hogy hogyan kell meghatározni a szektorkonfigurációt a belépő repülőgépszám alapján. Az egyetlen előírás az, hogy a repülőgépszámok nem léphetik át a kapacitásértékeket, ez azonban a legtöbb szituációban többféleképpen is megvalósítható. Jelen kutatásnak nem volt célja algoritmus kidolgozása a repülőgépszám alapú szektorkonfiguráció meghatározáshoz, ezért ezzel kapcsolatosan megpróbáltuk a supervisorok feltételezett döntési logikáját követni.

Mivel, ahogyan korábban is utaltunk rá, a szektorkonfigurációval kapcsolatos supervisor döntéshozás során a biztonság után a hatékonyság a második legfontosabb szempont, feltételezhetjük, hogy a supervisorok igyekeznek minden szituációhoz a legkevesebb légiforgalmi irányítót (szektort) rendelni úgy, hogy az még nem menjen a biztonság rovására. Ennek megfelelően mindig csak annyi részre osztottuk a szektorokat, amennyire feltétlenül szükség volt ahhoz, hogy a repülőgépszámok a kapacitásértékeken belül maradjanak. A supervisorok emellett feltételezhetően arra is ügyelnek, hogy a munkaterhelés minél egyenletesebben oszljon meg az irányítók között. Emiatt a szektorosztási határokat úgy határoztuk meg, hogy az önállóan használt („armed”) szektorokba belépő repülőgépek száma közel azonos legyen. Az olyan esetekben, amikor ez többféleképpen is megvalósítható volt, mindig az alacsonyabban elhelyezkedő határ mentén osztottuk fel a szektorokat. Ez azzal indokolható, hogy a deklarált szektorkapacitás-értékek alacsonyabbak az alacsonyabban elhelyezkedő elemi szektorokban, vagyis feltételezhetjük, hogy ugyanaz a forgalom ezekben nagyobb munkaterhelést jelent.

4.2 Komplexitáson alapuló módszer

Az optimális szektorkonfiguráció meghatározása a 3. fejezetben bemutatott komplexitáson alapuló neurális hálós módszer eredményei alapján összetettebb feladat, mint ugyanezen számítások elvégzése a belépő repülőgépek száma alapján. Ha neurális háló eredményei tökéletesen pontosak lennének, vagyis a háló minden szituációban, minden lehetséges szektorra a supervisorok szerint is ideális állapotot javasolná, akkor a szektorkonfiguráció előállítására sem jelentene problémát, hiszen nem kellene mást tenni, mint a háló által „armed” állapotúnak ítélt szektorok által kiadott konfigurációt használni. A háló azonban, ahogyan a 3. fejezetben láthattuk, nem mindig szolgáltat pontos eredményeket és bár a pontosságot valószínűleg lehetne növelni az ott felvázolt módszerekkel, az akkor sem érné el a 100 %-os értéket. A pontatlanság szinte mindig ellentmondásokhoz vezet a szektorok optimális állapotával kapcsolatban, ami azzal magyarázható, hogy a különböző neurális hálók által reprezentált szektortípusok (légtér, elemi szektorok, légtérblokkok) implicit módon jelen vannak a többi hálóban is. A légtérblokkok például részei a teljes légtérnek,

így ha utóbbi optimális állapota „armed”, akkor a légtérblokkok optimális állapota „merged” kell, hogy legyen (ellenkező esetben valamelyik eredmény hibás) és hasonló összefüggés figyelhető meg a légtérblokkok és az elemi szektorok vonatkozásában is.

A hibák miatt tehát nem adható egyértelmű módszer a szektorkonfiguráció szektorállapotok alapján történő előállítására, ugyanakkor többféle algoritmus is megalkotható, amivel közelíteni lehet az optimális szektorkonfigurációt. Ezen felül az ilyen algoritmusokkal lehetséges a neurális hálók eredményeiben jelentkező hibák egy részének korrigálása is, mivel figyelembe lehet venni bennük a különböző szektortípusokhoz tartozó eredmények fentebb ismertetett összefüggéseit. Az algoritmus létrehozása tehát jelen esetben nem más, mint a különböző neurális hálók (nem feltétlenül pontos) eredményeinek összehangolása és az egymásnak ellentmondó eredmények közti prioritások meghatározása. A szektorkonfigurációt előállító algoritmus megfelelő kidolgozása azért is fontos, mert egy esetleges légiforgalmi komplexitáson alapuló supervisor döntéstámogató szoftverben is szükség lehet rá.

A szektorkonfiguráció előállítására három fő módszert alkothatunk, melyek megfeleltethetőek a három lehetséges szektorállapotnak. Az „armed” módszer esetében minden szituációban meg kell vizsgálni, mely szektoroknak „armed” az ideális állapota és ezek fogják kiadni a használandó szektorkonfigurációt. Ezt a módszert csak 100%-os vagy ahhoz közeli pontosságú eredmények esetén lehetne használni, mivel más esetben a légtér egy része „hiányozna” a konfigurációból vagy az „armed” szektorok részben fednék egymást.

A „merged” módszer lényege az lenne, hogy az elemi szektorok szintjéről indulva mindig összevonjuk azokat a (szomszédos) szektorokat, melyek optimális állapota „merged”. A módszer használatakor minden összevonási lépés után meg kell vizsgálni azt is, hogy az összevonással létrejött újabb szektort is össze kell-e vonni egy másikkal. Ha egy szektort több másikkal is lehetséges összevonni, akkor érdemes minden lehetőségre megnézni azt is, mi lenne az összevonással létrejött szektor ideális állapota.

A „split” módszer használatakor a „merged” módszerrel ellentétes irányú logika mentén kell haladni, azaz a légtértől indulva mindig osztani kell azokat a szektorokat, melyek ideális állapota „split”. Mivel a légtérblokkok esetében az osztások gyakran több határ mentén is elvégezhetőek, ezért ezeknél meg kell vizsgálni az osztással létrejött szektorok ideális állapotát is. Természetesen lehetséges a módszerek együttes használata is. Elfogadhatjuk például, hogy a W vagy E szektort osztani kell, utána pedig megvizsgálhatjuk, van-e olyan elemi szektor, melynek optimális állapota „armed” és ha van, foglalkozhatunk az „armed” elemi szektor kivétele után kapott légtérblokk(ok) lehetséges állapotaival.

Mivel az általunk használt neurális hálók mind az elemi szektorok, mind a légtérblokkok esetében az „armed” állapottal kapcsolatosan mutatták a legnagyobb pontatlanságot, ezért a

más esetben leginkább egyszerűnek tűnő „armed” módszert nem alkalmazhatjuk. A „merged” és a „split” megközelítés közötti választáshoz azt érdemes megvizsgálni, hogy a szektorok melyik szintjéhez milyen mértékű pontosság tartozott a neurális hálók kiértékelésekor.

Mivel a legnagyobb pontosságot a légtérhez, valamint a W és E légtérblokkhoz tartozó háló mutatta, ezért kézenfekvőnek tűnik ezektől a szektoroktól indulni és első lépésként elfogadni a hálóknak az ezekre vonatkozó eredményeit. Azokban az esetekben, amikor a W vagy az E légtérblokkot osztani kell, a légtérblokkokhoz és az elemi szektorokhoz tartozó hálók eredményeivel kell folytatnunk a vizsgálatot. A két szektortípus közül az elemi szektorokra vonatkozóan vannak pontosabb eredményeink. Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy a háló nagyon kevés esetben ítél „armed”-nak olyan elemi szektort, amelynek valójában nem ez az ideális állapota. Emiatt helyesnek fogadhatjuk el, ha egy elemi szektor állapota „armed” és ilyen esetekben elég a légtérblokkok közül azokkal foglalkozni, amelyek nem tartalmazzák az adott elemi szektort.

A légtérblokkok helyes állapotának meghatározása többféle módon is történhet. A legkézenfekvőbb megoldás az lenne, ha minden blokknál azt az állapotot fogadnánk el, amelyikhez a legnagyobb érték tartozik, ez azonban a már ismertetett hibák miatt nagyon sok esetben akkor is a „split” állapot, ha valójában nem ez lenne a szektor optimális állapota. Emiatt ez a logika gyakran vezetne túl sok szektor használatához, ami bár biztonsági szempontból elfogadható, a hatékonysági követelménynek nem tesz eleget. Egy másik módszer lehet az, ha összehasonlítjuk egy adott szituációban egy adott állapot értékeit a különböző légtérblokkok esetében. Vizsgálhatjuk például, hogy melyik blokkra adódott a legnagyobb „armed” érték és ezt a blokkot „armed” állapotúnak fogadhatjuk el, vagy mondhatjuk, hogy azt a blokkot, amelyiknek a legnagyobb a „split” értéke, mindenképpen osztani kell. Vizsgálhatjuk azt is, hogy a különböző osztások (vagy összevonások) hatására létrejövő szektoroknak milyen lesz az összesített vagy átlagos értéke valamelyik állapotra vonatkozóan. Ha például azt kell eldönteni, hogy az osztást az M és az U vagy az U és a H elemi szektor határán hajtsuk végre (vagyis például a WLM + WUHT és WLMU + WHT osztás közül kell választanunk), akkor dönthetünk az alapján, hogy a WLM-hez és WUHT-hez vagy a WLMU-hoz és WHT-hez tartozó „armed” értékek összege közül melyik a nagyobb.

Az a módszer, amelyet végül használtunk szintén a különböző légtérblokkokhoz tartozó értékek összehasonlításán alapul, de elsősorban nem az „armed”, hanem a „split” értékekkel foglalkozik. A módszer lényege, hogy azt vizsgáljuk, hogy a lehetséges határok közül melyik mentén mennyire lenne célszerű az osztást végrehajtani. A célszerűség mértékét az adott határt magukban foglaló légtérblokkok „split” értékeinek átlaga adja meg és az osztást értelemszerűen a legnagyobb értékhez tartozó határ mentén kell végrehajtani.

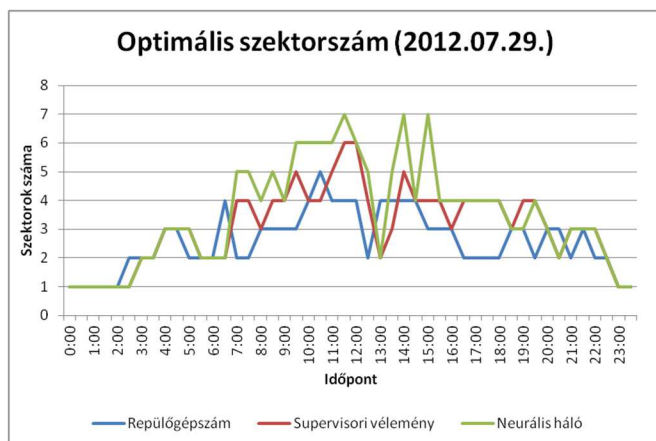
Összefoglalva, a szektorkonfiguráció meghatározására szolgáló algoritmus lépései a következők:

1. A teljes légtérre vonatkozó eredmények vizsgálata – ha „armed”, akkor 1 szektor az optimális
2. A W és E légtérblokkokra vonatkozó eredmények vizsgálata – ha mindkettő „armed” (vagy az egyik „armed”, a másik „merged”), akkor 2 szektor az optimális (W és E), ha bármelyik „split”, akkor meg kell vizsgálni az adott légtérblokkban a kisebb blokkokat és elemi szektorokat
3. Az elemi szektorokra vonatkozó eredmények vizsgálata – ha van „armed” állapotú, akkor annak „armed”-ként kell bekerülni a konfigurációba
4. A különböző szektorhatárokhoz tartozó átlagos „split” értékek kiszámítása a (nem W és E) légtérblokkokhoz tartozó eredmények alapján – osztás a legnagyobb átlagos értékhez tartozó határ mentén (vagy több azonos érték esetén az alacsonyabban elhelyezkedő határ mentén)
5. Az átlagos „split” érték kiszámítása az előző lépésben végrehajtott osztás után létrejött, legalább 2 határt tartalmazó légtérblokkokban található határookra – ha van 0,5-nél nagyobb érték, akkor osztás a legnagyobb átlagos értékhez tartozó határ mentén; a lépést addig kell ismételni, amíg van 2-nél több határt tartalmazó légtérblokk
6. Az egy szektorhatárt tartalmazó légtérblokkok „split” értékének vizsgálata – 0,8-nél nagyobb érték esetén a légtérblokk osztása

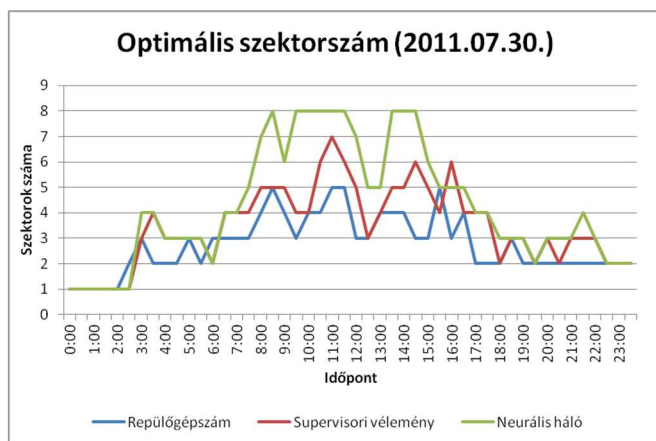
Az algoritmusban minden lépést csak akkor kell végrehajtani, ha a korábbi lépések alapján még nem állt elő a teljes szektorkonfiguráció. Mind az algoritmus logikája, mind a benne szereplő számértékek meghatározása során az volt az elsődleges szempont, hogy a kiadódó szektorkonfigurációk a neurális hálós eredmények hibái ellenére minél jobban közelítsék a supervisorok véleménye alapján adódó szektorkonfigurációkat a különböző forgalmi szituációkban. A korábban felvázolt további lehetséges megközelítéseket nem, vagy csak kisebb számú forgalmi szituációra teszteltük, így nem jelenthetjük ki, hogy a fenti algoritmus a lehetséges legjobb. Az 5. fejezetben nem csak a repülőgépszám alapján adódó eredményekkel hasonlítjuk össze a neurális háló által szolgáltatott eredményeket, hanem az algoritmus egyfajta validálását is elvégezzük a supervisorok véleményére alapozott szektorkonfigurációkkal történő összehasonlítással.

5. SEKTORSZÁMOK ÉS –KONFIGURÁCIÓK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az 1. és 2. ábra bemutatja a munkaterhelés szempontjából optimálisnak vélt sektorszám alakulását a 2012. július 29-éről (1. ábra) és 2012. július 30-áról (2. ábra) származó forgalmi mintákra a belépő repülőgépek számán alapuló módszer, a supervisorok véleménye és a 3. fejezetben bemutatott neurális hálós módszer (és a hozzá tartozó átszámítási algoritmus) alapján.



1. ábra: Az optimális szektorszám alakulása a különböző forgalmi szituációkra a 3 különböző módszer alapján 2012.07.29-ére vonatkozóan



2. ábra: Az optimális szektorszám alakulása a különböző forgalmi szituációkra a 3 különböző módszer alapján 2011.07.30-ára vonatkozóan

5.1 A repülőgépszám alapú eredmények összehasonlítása a supervisorori véleményekkel

Ahogy az 1. és 2. ábrán is látható, a supervisorori véleményekre alapozott szektorszámok változása nagyjából követi a belépő repülőgépek számán alapuló szektorszámok változását, vagyis általában a supervisorok szerint is akkor indokolt az új szektorok nyitása vagy a nyitva lévők összevonása, amikor ez a repülőgépszám alapú módszer szerint is szükséges. A szektorok száma ugyanakkor az esetek többségében nem egyezik meg, ami több dologgal is magyarázható.

Az eltérések egyik oka az, hogy a belépő repülőgépszámon alapuló eljárás alapja nem az adott pillanatban fennálló, hanem a közeljövőben várható forgalmi helyzet. A supervisoroknak ugyanakkor az interjúk során arra a kérdésre kellett válaszolniuk, hogy az adott forgalmi szituációt hány légitársasági irányító tudná kezelni úgy, hogy a munkaterhelés az optimális szint közelében legyen. A repülőgépszám alapú

módszer eredményei tehát inkább a közeljövőt, míg a supervisorori vélemények a jelent mutatják, amit akkor is könnyen beláthatunk, ha az 1. vagy a 2. ábrán a repülőgépszám alapú eredményeket képzeletben eltoljuk egy egységgel (30 perccel) jobbra. Egy ilyen transzformáció hatására nagyon kevés olyan eset maradna, amikor a supervisorori vélemény szerint alacsonyabb lenne az ideális szektorszám, mint a belépő repülőgépek száma alapján, vagyis amikor a supervisorok javasolnak kevésbé biztonságos konfigurációt.

A fenti képzeletbeli eltolás elvégzése után még mindig sok szituáció marad, ahol eltér a két módszer által szolgáltatott optimális szektorszám, de az is megfigyelhető, hogy szinte minden esetben a supervisorok javasolnak több szektort. Ennek legvalószínűbb oka az, hogy, ahogyan a 3. fejezetben is utaltunk rá, a supervisorok nem egyszerűen a repülőgépek száma, hanem a forgalom komplexitása alapján hozzák meg döntéseiket, megkérdezésük során pedig külön fel is hívtuk rá a figyelmüket, hogy szenteljenek minél nagyobb figyelmet a komplexitásnak. A supervisorok által javasolt nagyobb szektorszámokból két dologra következtethetünk. Az egyik, hogy, ahogyan arra már több kutatás is rámutatott az elmúlt évtizedekben, a légi forgalom komplexitása is jelentős mértékben hozzájárul a légitársasági irányítók munkaterheléséhez, amire emiatt nem lehet egyszerűen csak a kezelt légitársaságok számának függvényeként tekinteni. A másik következtetés az, hogy a supervisorok saját tapasztalatuk és a forgalmi komplexitás figyelembe vétele révén olyan extra intelligenciát visznek a légitársasági irányítás rendszerébe, amivel növelik a légi közlekedés biztonságát. Másképpen megfogalmazva, egy kizárólag a (várhatóan belépő vagy éppen a légtérben tartózkodó) repülőgépek számára alapozott szektorkapacitás számítási döntéstámogató rendszer önmagában nem rendelkezik a biztonságos és hatékony ATC rendszerhez szükséges intelligenciával, így indokoltnak tekinthető valamilyen, komplexitáson alapuló döntéstámogató szoftver kifejlesztése.

A két különböző módszer eredményeivel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy a supervisorori vélemények alapján előállított szektorkonfigurációk magasabb biztonsága nem jelenti, hogy a repülőgépszám alapú módszer eredményei nem biztonságosak. Az ezek alapjául szolgáló szektorkapacitás-értékek ugyanis Meyer *et al.*, 2009 alapján maguk is a biztonság irányába térnek el az Eurocontrol által használt szektorkapacitás számítási módszer eredményeihez képest.

5.2 A neurális háló eredményeiből nyert szektorkonfigurációk összehasonlítása a supervisorori véleményekkel

Az 1. és 2. ábráról az olvasható le, hogy a kevés (1, 2, 3 vagy 4) szektort igénylő szituációkban a neurális hálós eredményekből a 4. fejezetben bemutatott algoritmus alapján számított szektorszámok az esetek többségében megegyeznek a supervisorori véleményekre alapozott értékekkel. Mivel ezzel az összehasonlítással a célunk nem csak a kétféle eredmény közti összefüggés (vagy az összefüggés hiányának) megállapítása, hanem a szektorkonfigurációt kialakító algoritmus használhatóságának vizsgálata is, ezért érdemes

részletesebben is megnézni a különböző forgalmi szituációkra adódó eredményeket.

Az olyan szituációkban, ahol a teljes légtér optimális állapota „armed”-ra adódott (összesen 16 szituáció), a szektorkonfiguráció minden alkalommal egyezett a supervisorok véleményével. Azon 80 forgalmi szituáció esetében, amelyekben szükség volt a W és E légtérblokkhoz tartozó neurális háló eredményeire, az ezen eredmények alapján adódó döntések (kell-e osztani a W vagy E légtérblokkot) az esetek döntő többségében megegyeztek a supervisor döntésekkel. Eltérés összesen négy szituációban adódott, melyek közül háromban a tévedés a biztonság irányába történt (a javaslat a helyes „armed” helyett „split” volt).

Olyan szituációból, amelynél a szektorkonfigurációval kapcsolatos döntést az elemi szektorokra és a (nem W és E) légtérblokkokra adódó eredmények alapján kellett meghozni, összesen 69 adódott. Az ilyen esetekből mindössze 11-ben egyezett meg teljesen a supervisorok által javasolt és a neurális háló eredményei alapján számított szektorkonfiguráció, az eltérések azonban, még ha jelentősek is voltak, a biztonság (több szektor) irányába történtek. Az olyan esetekből, amelyekben mind a W, mind az E légtérblokkot osztani kellett (összesen 43 eset) 22 alkalommal fordult elő, hogy mindkettő esetében eltérő eredmény adódott, a többiben legalább az egyik légtérblokk felosztását helyesen adta meg a neurális háló, illetve az algoritmus. Az eltérő esetek többségében vagy megegyezett az optimális szektorszám és csak a szektorosztási határok tértek el (pl. WLMU + WHT felosztás helyett WLM + WUHT adódott) vagy eltért ugyan a szektorszám, de a neurális hálós eredmények alapján számított konfiguráció is tartalmazta a supervisorok által javasolt szektorosztási határt (pl. WLM + WUHT helyett WLM + WUH + WT adódott).

Ha figyelembe vesszük a neurális hálós módszer ismert hibáit és a szektorkonfigurációt meghatározó algoritmus kiforratlanságát, valamint azt, hogy az eredmények szinte minden esetben a biztonság irányába térnek el a supervisorok javaslataitól, akkor mondhatjuk, hogy a neurális hálós módszer alapján elfogadható eredményeket kaptunk az optimális szektorkonfigurációkra. A biztonság irányába történő túlzott tévedések ugyanakkor nem elfogadhatóak a légiforgalmi irányítás, illetve a légi közlekedés hatékonysága szempontjából, ráadásul a legnagyobb eltérések éppen a legnagyobb és legkomplexebb forgalmú szituációkban (a 8 és 16 óra közötti időszakban) adódtak, amikor egy döntéstámogató szoftver a legnagyobb segítséget nyújthatná a supervisoroknak. Mindez indokolttá teszi a neurális hálós módszer (és szükség esetén az átszámítási algoritmus) továbbfejlesztését a korábban felvázolt lehetőségek szerint.

5.3 A neurális háló eredményeiből nyert szektorkonfigurációk összehasonlítása a repülőgépszám alapúakkal

Az 5.2. alfejezetben megállapítottuk, hogy összefüggés figyelhető meg a neurális háló eredményeiből nyert szektorszámok (és szektorkonfigurációk) és a supervisorok véleményén alapuló szektorszámok között, bár előbbiek

rendre nagyobbak a biztonság irányába történő feltételezhetően túlzott tévedések miatt. Az 5.1. alfejezetben hasonló megállapítást tettünk a supervisor véleményekre alapozott és a repülőgépszámon alapuló eredmények vonatkozásában, bár itt a nagyobb biztonságú eredmények már nem hibáknak, hanem inkább az emberi intelligencia eredményeinek tekinthetőek. Ezen két megállapítás logikus következménye, hogy a neurális háló által szolgáltatott eredményekből nyert szektorszámok időbeni alakulása hasonló a repülőgépszám alapúakéhoz, de azoknál szinte minden esetben nagyobb. Különösen akkor igaz ez, ha a repülőgépszám alapú eredményeken végrehajtjuk az 5.1. alfejezetben említett 30 perces időbeni eltolást.

A két mennyiség között közelítőleg lineáris összefüggés figyelhető meg. A mennyiségek korrelációs együtthatója 0,7566, ha a két naphoz tartozó értékeket együtt vizsgáljuk. Ha külön vizsgáljuk a két nap értékeit, akkor 2011. július 30-ára 0,8296, 2012. július 29-ére pedig 0,6628 adódik. Ha a repülőgépszám alapú szektorszámokra a kapacitás, illetve a forgalomnagyság eltérő értelmezéséből származó hibák csökkentése érdekében elvégezzük a 30 perces időbeni eltolást, akkor a korrelációs együtthatók a 2. táblázat 3. oszlopában látható értékekre módosulnak.

2. Táblázat Neurális hálós és belépő repülőgépszám alapú módszerrel számított szektorszám értékek korrelációja

	Korrelációs együttható	Korrelációs együttható 30 perces eltolást követően
Összes érték	0,7566	0,8308
2011.07.30.	0,8296	0,8466
2012.07.29.	0,6628	0,8239

A korrelációs együtthatók magas pozitív értékei (különösen az eltolást követően) alátámasztják a megközelítőleg lineáris kapcsolatot a két mennyiség között. Mindez arra utal, hogy a neurális hálós eredmények megbízhatóak olyan szempontból, hogy ezek alapján az új szektorok nyitását és a nyitva lévő szektorok összevonását is megközelítőleg ugyanakkor (ugyanolyan forgalmi helyzetekben) kellene végrehajtani, mint a repülőgépek számán alapuló módszer szerint.

A neurális hálók eredményei alapján kiszámított szektorszámok, ahogyan az 1. és 2. ábráról leolvasható, közelebb állnak a supervisorok véleménye alapján adódó számokhoz, mint a repülőgépek számán alapulóakhoz. Ennek magyarázata értelemszerűen az, hogy a neurális hálók tanítása során a supervisorok véleménye alapján határoztuk meg a lehetséges szektorok optimális állapotait. Ez alapján mondhatjuk, hogy a supervisorokhoz hasonlóan a neurális hálós logika is képes lehet növelni a szektorkonfiguráció meghatározásával kapcsolatos döntések háttérben álló intelligenciát úgy, hogy ezzel javítsa a légiforgalmi irányítás biztonságát. A módszer ugyanakkor jelenlegi állapotában

valószínűleg túlzott mértékben téved a biztonság irányába, ami miatt a jelenlegi használatba vétele rontaná az ATC rendszer hatékonyságát.

A kétféle módszer eredményeinek összehasonlítása során érdemes azt is megvizsgálni, hogy miben és miért különbözik az eredmények közti összefüggés a két vizsgált napon, amiket megközelítőleg egy év választ el egymástól. Látható, hogy az eltolás nélküli korreláció jelentősen nagyobb a 2011-es forgalmi szituációk esetében, mint a 2012-eseknél, az eltolás hatására azonban ez a különbség minimálisra csökken. Ezzel párhuzamosan az is megfigyelhető (az 1. és 2. ábra szemrevételezésével), hogy az optimálisnak vélt szektorszámok közti különbség nagyobb a 2011-es napon, mint a 2012-esen. A két érdekes jelenség nem független egymástól. Az eltolás hatása a lineáris összefüggés erősségére éppen azért csekély, mert a nagyobb különbségek miatt a 2011-es napon a neurális hálón alapuló eredmények még csökkenés esetén is ritkán kerülnek az esetlegesen éppen növekvő repülőgépszám alapú értékek alá, míg a 2012-es napon ez többször is előfordul.

Az értékek közötti nagyobb különbségek oka 2012-ben az, hogy, ahogyan már utaltunk rá az 5.2. alfejezetben, a neurális hálón alapuló szektorkonfigurációk túlságosan magas biztonságának problémája annál nagyobb valószínűséggel jelentkezik, minél nagyobb a forgalom nagysága és komplexitása (azaz a supervisorok által optimálisnak tartott szektorszám). A supervisorok véleményére alapozott szektorszám láthatóan nagyobb a nap nagy részében a 2011-es napon, mint a 2012-esen (feltehetően a légtérben akkor még nagy számban megforduló Malév járatok miatt), ami magyarázza a neurális hálós eredményekben jelentkező nagyobb hibákat és az ezekből fakadó nagyobb eltéréseket.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ugyanazon forgalmi szituációkra három különböző módszerrel (gyakorló supervisorok véleménye alapján, a belépő repülőgépek száma alapján és neurális hálós számítással nyert optimálisnak vélt szektorállapotok alapján) meghatározott optimális szektorszámok és szektorkonfigurációk vizsgálata során megállapítottuk, hogy a kevés (4-nél nem több) szektort igénylő szituációkban a három eredmény az esetek többségében megegyezik. Szintén megfigyelhető volt, hogy mindhárom érték között erős pozitív korreláció áll fenn, azaz ha az egyik érték nem kisebb „A” szituációban, mint „B” szituációban, akkor jellemzően a másik két érték sem kisebb. Nagyobb eltérések adódtak ugyanakkor a magasabb szektorszámot igénylő szituációkban, ahol úgy tűnik, a supervisorok hajlamosak biztonságosabb szektorkonfigurációkat használni, mint amit a repülőgép szám alapú módszer minimálisan előír, a neurális módszer pedig olyan mértékben téved a biztonság irányába, hogy az valószínűleg nem lenne megengedhető hatékonysági szempontból.

A biztonság irányába való túlzott tévedés magyarázata az, hogy a neurális hálós módszer jelenlegi megvalósítása rendelkezik ismert hibákkal, melyeknek sem részletes

elemzése, sem javítása nem képezte jelen kutatás szűk értelemben vett tárgyát, a jövőben azonban mindenképpen foglalkozni kell velük, például a 3. fejezet végén felsorolt módszerek valamelyikének használatával. Az összehasonlítás eredményei ugyanakkor rámutattak arra, hogy a módszert a hibák ellenére sem lehet a biztonság és megbízhatóság hiányára hivatkozva használhatatlannak nyilvánítani, mivel ezt legfeljebb a kevésbé lényeges hatékonyság hiánya indokolná. Az eredményekből az is feltételezhető, hogy a módszer képes a supervisorokhoz hasonlóan többlet intelligenciát adni a szektorszámokkal kapcsolatos döntéshozáshoz (még ha egyelőre nem is olyan kifinomult mértékben), ami miatt érdemes lehet a továbbiakban foglalkozni a módszer továbbfejlesztésével.

HIVATKOZÁSOK

- Blackman, H.S., Gertman, D.I. és Boring, R.L. (2008). Human Error Quantification Using Performance Shaping Factors in the SPAR-H Method. *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, New York
- Endsley, M.R. (1999). Situation Awareness and Human Error: Designing to Support Human Performance. *Proceedings of the High Consequence Systems Surety Conference*. Albuquerque
- Flynn, G.M., Benkouar, A. és Christien, R. (2005). Adaptation of Workload Model by Optimisation Algorithms and Sector Capacity Assessment. *EEC Note No. 07/05*
- 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, ICRAT 2006*, Belgrád
- Hollnagel, E. (1993). *Human Reliability Analysis: Context and Control*. Academic Press, London, UK
- Inoue, S., Aoyama, H., Nakata, K. és Furuta, K. (2010). Managing ATC expertise based on distributed cognition analysis. In: *Reliability, Risk and Safety* (Ale, Papazoglou & Zio. (Ed)), 1993-1999, Taylor & Francis Group, London, UK
- Liu, Y., Seelhorst, M., Pozdnukhov, A., Hansen, M. és Ball, M.O. (2014). Assessing Terminal Weather Forecast Similarity for Strategic Air Traffic Management. *Proceedings of the 6th International Conference on Research in Air Transportation, ICRAT 2014*, Isztanbul
- Meyer D., Károlyi I., Renner P., Bécsi T., Szabó G. és Aradi Sz. (2009). Gyakorlati alapú szektorkapacitás-meghatározás validálása légiforgalmi irányítói terhelésen alapuló módszerrel. *Közlekedéstudományi Szemle* **59(5)**, 19-29
- Martinie, C., Palanque, P., Navarre, D. és Winckler, M. (2010). A formal approach supporting effective and efficient training program for improving operators' reliability. In: *Reliability, Risk and Safety* (Ale, Papazoglou & Zio. (Ed)), 1828-1835, Taylor & Francis Group, London, UK
- Péter T. és Szabó K. (2012). A new network model for the analysis of air traffic networks. *Periodica Polytechnica-Transportation Engineering* **40(1)**, 39-44

- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. Elsevier Science, New York, NY, USA
- Reason, J. (1987). Generic Error-modelling System: A cognitive framework for locating common human error forms. *New Technology and Human Error*. Wiley, Chichester, UK
- Rodriguez Uclés, N. és García, J.M. (2014). Relationship between Workload and Duration of ATC Voice Communications. *Proceedings of the 6th International Conference on Research in Air Transportation, ICRAT 2014*, Isztambul
- Rohács J. és Horváth Zs. (2013). A repülésbiztonság problémája és fejlesztési elvei. *Repüléstudományi Közlemények* **25(3)**, 39-55
- Skorupski, J. (2010). Air traffic smoothness as a measure of air traffic safety. In: *Reliability, Risk and Safety* (Ale, Papazoglou & Zio. (Ed)), 707-713, Taylor & Francis Group, London, UK
- Stager, P. és Hameluck, D. (1990). Ergonomics in air traffic control. *Ergonomics* **33(4)**, 493-499
- Strenzke, R. és Schulte, A. (2011). Modeling the Human Operator's Cognitive Process to Enable Assistant System Decisions. *Proceedings of the 21st International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Freiburg
- Számel B. és Szabó G. (2013). Légtérkapacitás számítás elméleti modellek alapján. *Repüléstudományi Közlemények* **26(2)**, 296-330
- Sztrunga E. (2013). Az európai légtérfejlesztéseket kiváltó tényezők. *Közlekedéstudományi Szemle* **63(3)**, 13-21
- Wickens, C. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance (Second Edition)*. Harper-Collins, New York, NY, USA
- Yemelyanov, A.M. (2009). Modeling and Decision Support for Analysis of Operator Errors in Complex Systems. *Journal of Computers* **4(4)**, 319-329