



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
KÖZLEKEDÉS- ÉS JÁRMŰIRÁNYÍTÁSI TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

A légiforgalmi irányítás automatizálási lehetőségei

Jáger Rebeka Anna

Konzulens: Dr. Szabó Géza

2023

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	2
1. Funkcionális biztonság	3
1.1 A funkcionális biztonság elérése	3
1.2 A légiforgalmi irányítás rendszere	4
1.3 Légiközlekedési biztonsági szabványok.....	6
2. A légiforgalmi irányítás automatizálása	9
2.1 Korábbi automatizálási projektek.....	9
2.1.1 AERA - Automated En-Route Air Traffic Control	10
2.1.2 EUROCONTROL – ARC2000	10
2.1.3 SAINTEX Projekt	10
2.1.4 FREER Project	11
2.1.5 Autopace.....	11
2.2 Az automatizálás alapelvei.....	12
2.2.1 Az automatizálás szintjei.....	12
2.2.2 Emberi tényező.....	14
2.3 Adaptív automatizálás	17
3. Az automatizált irányítás koncepciója.....	19
3.1 Rendszerarchitektúra	19
3.2 Matematikai modell.....	22
3.2.1 A feladatok csoportosítása.....	22
3.2.2 A forgalmi állapottól függő feladatok	24
3.2.3 Munkaterhelés szabályzás	25
4. Szimulációs környezet	27
4.1.1 Specifikáció	27
4.1.2 Megvalósítás.....	30
5. Eredmények értékelése	34
5.1 Elért eredmények.....	34
6. Konklúzió	37
Felhasznált irodalom	38
Ábrajegyzék.....	41
Táblázatjegyzék.....	42

Bevezetés

Általános tendencia a műszaki életben, hogy gépek és programok veszik át az ember szerepét, amelyek költséghatékonyabban és biztonságosabban dolgoznak; és például a közlekedésirányításban, a humán irányítóról átteszik a felelősséget a tervezőre, akinek feltehetően több idő és erőforrás áll rendelkezésére a feladat megoldásához. Számos iparágban léteznek már magas biztonsági elvárású automatizmusok, például a vasúti közlekedésben, az autópárhuzban vagy a nukleáris iparban, azonban a légitforgalom irányítása még mindig elsősorban humán alapú. Az automatizált légtér megoldásának kutatására és fejlesztésére az elmúlt évtizedekben tapasztalható egyre szűkösebb légtér-kapacitás nyomán számos projekt irányult, de nincs széles körben alkalmazható megoldás. Ennek okai vélhetően a megfelelő biztonság elérésében rejlő, a légitforgalmi irányítás specialitásain alapuló nehézségek. A dolgozat célja egy olyan új automatizálási megoldás kidolgozása, amely ötvözi a gépi automatizmusokat a humán irányítás széleskörű problémamegoldó képességével és így a teljes funkcionális térre megfelelő biztonságot képes szavatolni a teljesítőképesség jelentős növekedése mellett.

Az első fejezetben bevezetésként a funkcionális biztonság alapelvei és a légitforgalmi irányítás rendszere kerül röviden áttekintésre, majd ezek összekapcsolásaként a légiközlekedési biztonsági szabványok rövid bemutatása következik. A második fejezetben az automatizált irányítás bevezetésének egy új módja került kidolgozásra, melynek fő vezérelve az aktuális irányítási struktúra, a szektorizáció megtartása. Ekkor lehetőség nyílik az egyes funkciókat fokozatosan gépi irányítás alá vonni, a más rendszerekkel és részrendszerekkel való interfészek megtartása mellett, így az automatizált megoldás erőforrás-hatékonyabban megvalósítható, mintegy moduláris formában, egy-egy szektor automatizálásával úgy, hogy ez a környező szereplők számára nem jelent változást. A másik lehetőség a teljes rendszer automatizálása egy lépésben, ez azonban nem életszerűen bevezethető.

A légitforgalmi irányítás szerteágazó funkcionalitása miatt igen komplex feladat, nagy felelősség egy ilyen rendszertől elvárt specifikáció kidolgozása, és annak validálása. Így a harmadik fejezetben kidolgozott elvben a fő cél a specifikációs felelősség csökkentése; azáltal, hogy a javasolt struktúrában nem szükséges a specifikáció teljességének garantálása. A rendszer funkcionális biztonságának eléréséhez a humán irányító továbbra is a rendszer része; így a specifikációs téren kívül eső feladatokat ő oldhatja meg. A légitforgalmi irányítás várhatóan relatív magas szinten specifikálható, a humán irányítónak ritkán érkezne feladata, így kulcsfontosságú azzal foglalkozni, amikor specifikáción kívül eső feladat érkezik, – amely várhatóan nagy komplexitású lehet, – akkor a humán irányító képes legyen annak magas biztonságú kezelésére. Ennek biztosítása részben a megfelelő helyzettudatosságon keresztül történik, részben pedig a munkaterhelésének fenntartásával, elkerülve a túl alacsony, illetve a túl magas munkaterhelési szinteket. Ezen két kritérium úgy érhető el, ha a gépi irányítás az egyébként általa megoldható feladatok közül választ, és azt az irányítónak allokálja. Ezen kívül a harmadik fejezetben kidolgozásra került a vázolt, ember-gép munkamegosztáson alapuló irányítási struktúra matematikai modellje, a munkaterhelés optimalizációjával és a helyzettudatosság szinten tartásával.

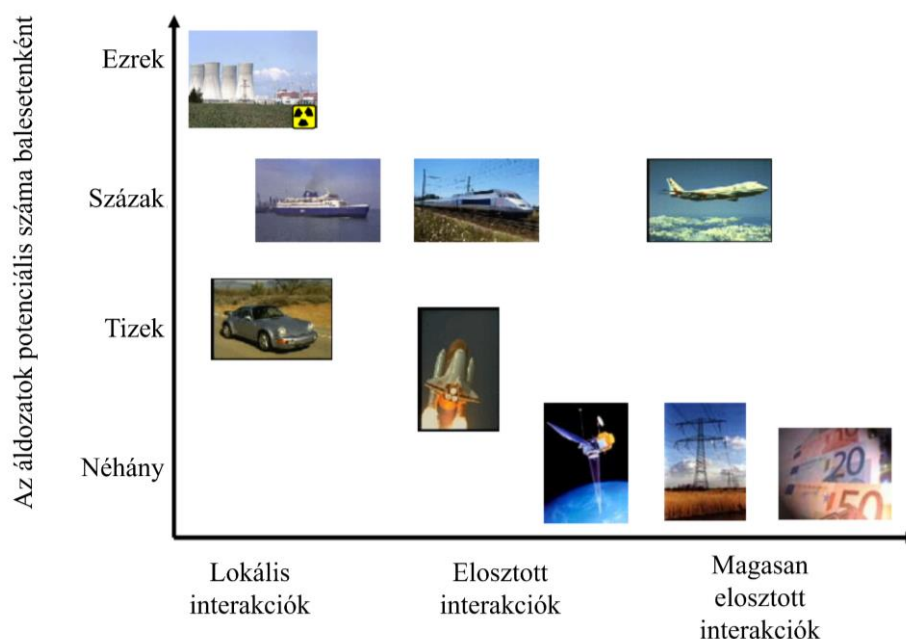
A negyedik fejezetben az ember-gép munkamegosztási modell, a feladatallokációs logika működésének tesztelésére alkalmas szimulációs környezet létrehozása történt. Az eredmények értékelését, tekintettel a további fejlesztési irányok kijelölésére, az ötödik fejezet tartalmazza.

1. Funkcionális biztonság

Bevezetésként a funkcionális biztonság elmélete és a légiforgalmi irányítás rendszere kerül röviden áttekintésre, majd összekapcsolásként a légiközlekedési biztonsági szabványok rövid bemutatása következik.

1.1 A funkcionális biztonság elérése

A technológia fejlődésével létrejövő egyre komplexebb rendszerek egyre komplexebb módon képesek veszélyeztetni az emberéletet, így fokozatosan előtérbe került a társadalom biztonság iránti igénye. Néhány biztonságkritikus ágazatról az 1. ábra ad összefoglalót az interakciók térbeli elosztottsága és az áldozatok potenciális száma szerint.



1. ábra: A légi közlekedés összehasonlítása más összetett és/vagy biztonságkritikus iparágakkal a balesetenkénti potenciális halálos áldozatok száma és az interakciók szintje szempontjából [1]

A funkcionális biztonság nem a megvalósításból, hanem az eszköz tervezett funkcióiból ered. A számítógépes rendszerek megjelenése előtt viszonylag alacsony komplexitású technikai rendszerek léteztek, úgy vélték, hogy létezik az abszolút biztonság és ezek alapos tesztelésével elérhető. Az elektronikai rendszerek és főleg a programozott elektronikus rendszerek megjelenésével, a rendszerek komplexitásának növekedésével egyre kevésbé volt uralható a fejlesztés során elkövetett emberi hiba, nyilvánvalóvá vált, hogy tesztelésre nem alapozható a biztonság, minőségmenedzsmentre volt szükség. Ennek szigorúságát a berendezés funkciótévesztései által okozott kockázathoz próbálták kötni. Így a tervezés minden funkció esetében adott biztonságra történik, amely ugyan műszakilag jól, de jogilag nehezen kezelhető.

A biztonságmenedzsment fő elvei a biztonságkritikus rendszerek fejlesztésére vonatkozóan a különböző iparági szabványokban eltérő mértékben jelennek meg, a következők: [2]

- Az életciklusban gondolkodás: fejlesztés, működtetés, leszerelés – ez azért fontos, mert a működtetés során szükséges eljárások forrása a tervezés.
- Az életciklus fázisainak elkülönítése: átlátható részek létrehozása.
- Az információk rögzítése, dokumentálás: az adott fázisban képződő eredmények rendelkezésére állásához köthető a következő fázis kezdete.
- Kompetencia, azaz, hogy a tevékenységet végző személy feladatának megfelelő képzettséggel, tapasztalattal rendelkezzen.
- A humán redundancia a feladatot végző és az azt ellenőrző személy különbözőségét jelenti. Az ellenőrzés 3 szinten valósul meg: a verifikáció az adott életciklus fázis ellenőrzése, a validáció a végső ellenőrzés, a bemeneti specifikációhoz képest, a biztonság értékelés (safety assesment), nem az eredmény jóságával foglalkozik, hanem az adott életciklus fázisban alkalmazott módszerek helyességével (ágazatspecifikus szabványok szerint).
- A vállalaton belüli „önértékelés”, azaz a cég felelősség vállalása a követelmények teljesítéséért.

A legfontosabb szabványok közé tartozik az IEC-EN-MSZ 61508 [2], amely általánosan rögzíti a biztonságkritikus rendszerek fejlesztésének módszereit. Az iparágspecifikus szabványok eltérő mértékben építenek erre; kiemelendő a vasúti CENELEC EN 5012X (és IEC megfelelői) [3], valamint az autógyártásban alkalmazott ISO 26262 szabványra épülő SOFIF (Safety of Intended Functionality) ISO/PAS 21448:2019 szabvány [4]. A SOTIF megalkotása mögötti motiváció párhuzamba állítható a légiforgalmi irányítással; az autógyártásban zajló törekvések hosszútávú célja a humán komponens kiváltása, mivel a rendszerben jelentős veszélyt jelent. Olyan tervezett funkciókra vonatkozik, amelyeknél a megfelelő helyzetfelismerés kritikus a biztonság szempontjából és ezt összetett érzékelők és feldolgozó algoritmusok biztosítják. A funkcionális teret 4 területre rendezi; ismertség és biztonság szerint, így lehet ismert biztonságos, ismert nem biztonságos, ismeretlen nem biztonságos és ismeretlen biztonságos szcenárió, a végzett tevékenységek célja felismerni a helyzetek kiértékelése és az ismert biztonságos terület arányának maximalizálása.

1.2 A légiforgalmi irányítás rendszere

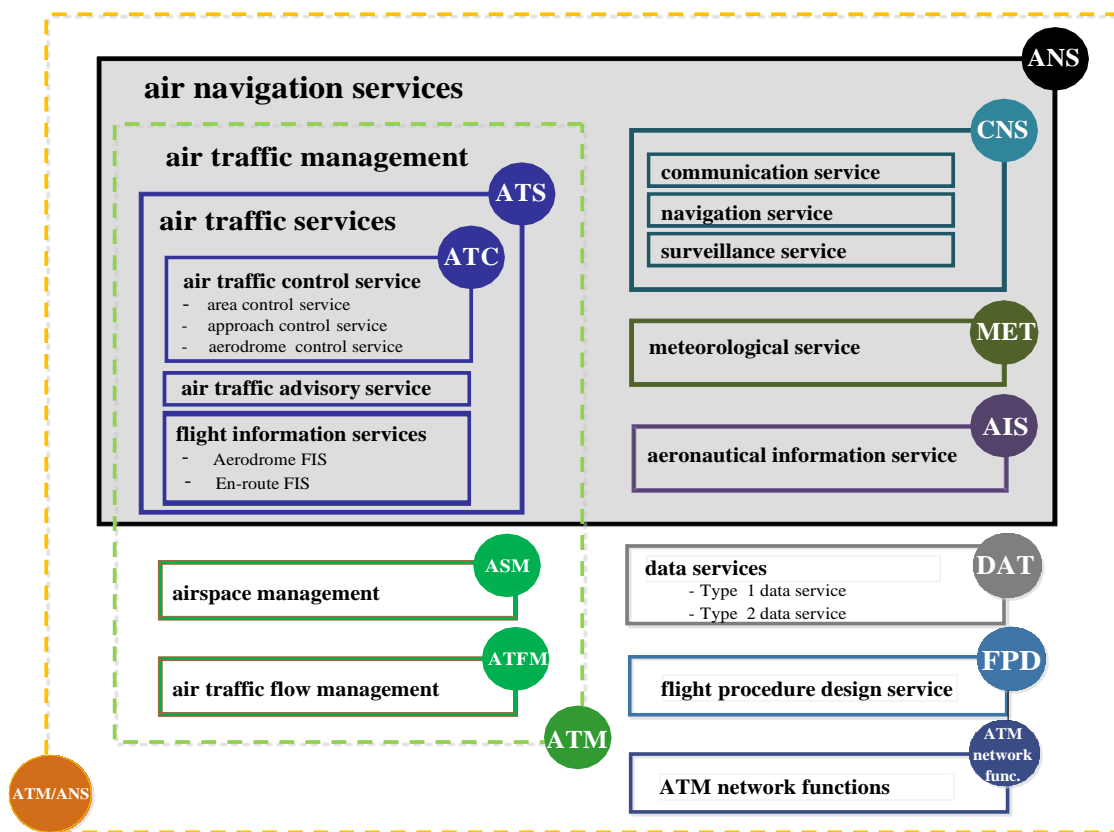
Összefoglalóan a léginavigációs szolgáltatások, a légi járatok indításából és működtetéséből álló szolgáltatások, adatfeldolgozásból és -formázásból, valamint az általános légi forgalom számára történő adatszolgáltatásból álló rendszert ATM/ANS (Air Traffic Management, Air Navigation Services – Légiforgalmi menedzsment, Léginavigációs szolgálatok) névvel illetik. Ez számos további alrendszerre bontható a 2. ábra szerint. [5]

Az ANS számos különböző szolgálatból áll; a kommunikációs, navigációs és felderítési, a meteorológiai, a légiforgalmi információs és a légiforgalmi szolgálatokból. A légiforgalmi irányítás ez utóbbiba, az ATS-be tartozik. [5]

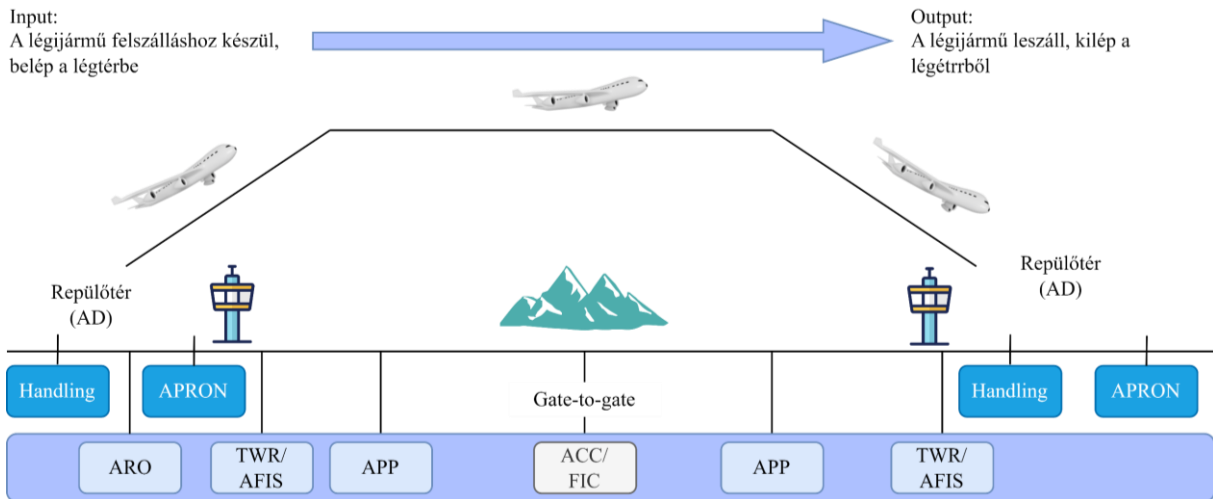
Az ATC további különböző részrendszerekre bontható, melyet a repülés fázisai alapján a 3. ábra illusztrál. A folyamat nulladik lépése a repülési tervek leadása, amely a repülésbejelentő irodán (ARO) keresztül lehetséges. A repülőtéri gurulóutak, futópályák, és a repülőtér körüli CTR légtér (Control Zone) felügyelete toronyirányítás (TWR) feladata. A repülőtér megközelítő és elhagyó forgalom koordinálása a bevezető irányítás (APP) felelőssége a TMA (Terminal Movement Area) légtéren belül. Irányított magaslégtérben az ACC (Area Control Center), nem irányított légtérben pedig repüléstájékoztató szolgálat (FIS) működik. [5]

A távolkörzeti légiforgalmi irányítási folyamat hagyományosan párokban történik, a tervező irányító (PC, Planning Controller) és végrehajtó irányító (EC, Executive Controller) pozíciókban. Egy EC-PC páros felelősségi területe egy szektor. A PC feladata, hogy a légijárművek szektorba lépését megelőzően figyelje a szándékolt útvonalukat, és olyan egyeztetéseket végezzen (pl. a szomszédos szektorral a belépési pontot és magasságot illetően), melynek eredményeképpen lehetőség szerint konfliktus mentes útvonalat tud biztosítani a légijármű számára. Közben az EC a már szektorban lévő, konfliktáló légijárművekkel kommunikál, utasítások adásával feloldja a konfliktust.

Automatizált légiforgalmi irányítás kidolgozásakor kulcsfontosságú, hogy az illeszkedjen ezen folyamatba. Célszerű megoldás az automatizmust egy-egy szektorban működtetni, a többi szektor közötti interfészeket megtartva, így a fejlesztés realizisztikusan, lépésenként bevezethető. Ha a gépi irányítás egyaránt ellát az EC-hez és a PC-hez tartozó feladatokat is, akkor az EC-PC szerepek kis mértékben elmosódhatnak, azonban a tapasztalat azt mutatja, hogy a jelenlegi irányítási struktúrában is előfordulhat ilyen, különösen nagy forgalmi terheltség mellett és zavaró körülmények (pl. zivatarkerülés) mellett.



2. ábra: Az ATM/ANS részrendszerei [5]



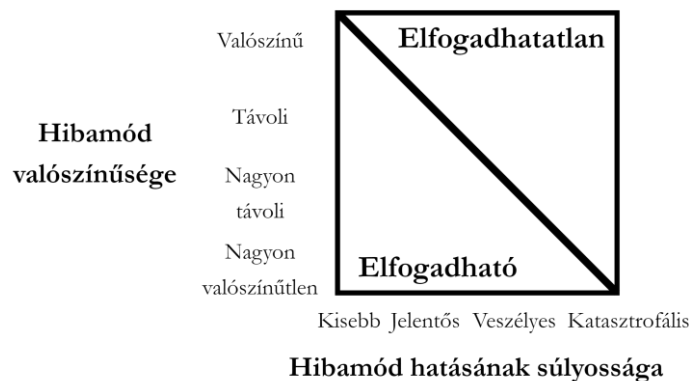
3. ábra: Az ATC részrendszerei

1.3 Légiközlekedési biztonsági szabványok

Az ATM beli biztonsági események jelentése és értékelése, valamint kockázatértékelés és kockázatcsökkentés vonatkozásában korábban az Eurocontrol által kiadott ESARR-ok (European Safety Regulatory Requirements), melynek célja a légiforgalmi szolgáltatásnyújtástól elkülönülve a biztonsági szabályozási rendszer többoldalú fejlesztése, harmonizálása, közül az ESARR 2 és 4 volt irányadó [6]. Ehelyett az Európában általános gyakorlat szerint az 2017/373 EU rendelet alkalmazandó. [5]

A dolgozat témájából adódóan elsősorban az ANS rendszerek működésére vonatkozó szabványok relevánsak, azonban az iparágban nagy jelentőséggel bíró CS 25 is röviden bemutatásra kerül, amely a légitársaságokra vonatkozik. A Joint Aviation Authorities (JAA) – Társult Légügyi Hatóságok utódja. A JAA által létrehozott, és az FAA által is befogadott FAR/EASA – CS 25.1309 szabvány (System Design and Analysis) 1988-ban jelent meg, minden légitársaságra telepített rendszer esetében kötelező jelleggel alkalmazandó a megfelelőség igazolás alapjaként. Az EASA ekvivalens szabályozása a CS25, folyamatos módosításokon keresztül frissül (pl. 2020 Amendment 25 Aircraft cybersecurity). [7]

Célja a légitársaság rendszereinek és berendezéseinek elfogadható biztonsági szintjének biztosítása. A repülési óránkénti átlagos valószínűség és a hibaállapot hatásainak súlyossága között logikus és elfogadható fordított aránynak kell lennie, a 4. ábra szerint.



4. ábra: A repülési óránkénti átlagos valószínűség és a hibaállapot hatásainak súlyossága közötti összefüggés [7]

A valószínűség és a hibaállapot közti kapcsolatot leírásával szám értékű valószínűségeket is megad, amelyek kockázatelemzés során használhatók, továbbá megfogalmaz egy repülésbiztonsági fejlesztési keretrendszert is, amely életciklus modellre épül.

A European Organisation for Civil Aviation Equipment (EOCAE) nonprofit szervezet olyan légiközlekedési stakeholdereket tömörít, mint a gyártók, üzemeltetők, szabályzó szervek. Céljuk a globálisan egységes gyakorlatok kialakítása a szabványokon keresztül, melyeket a társszervezetektől delegált szakértőkből létrehozott munkacsoport alkot meg. [8] A dolgozat témájának szempontjából meghatározó szabványa az ED-109A (Software Integrity Assurance Considerations For Communication, Navigation, Surveillance And Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems). Az ED-109A egy sor olyan célkitűzést határoz meg, amely annak biztosítására ajánlott, hogy a kifejlesztett (nem fedélzeti) CNS/ATM szoftver rendelkezzen a biztonsági alkalmazásban való használathoz szükséges integritással. [9] A szoftver hibából eredő hibaállapotok teljes definícióját a megfelelő hatóságokra bízva, tágabb értelemben két kategóriát állít fel:

- amelyek potenciálisan hatással vannak a légtér biztonságára,
- amelyeknek nincs valószínűsíthető konzekvens hatása a légtérre vagy a repülőközönségre (de például a földi kiszolgáló személyzetet veszélyeztethetik).

Példaként említi a nagy légi járművekre vonatkozó hibaállapotok definícióit (katasztrofális, veszélyes, jelentős, kisebb, nincs biztonsági hatás) és e mentén állítja fel a megbízhatósági szintek definícióit:

- AL1: a légi jármű katasztrofális hibaállapotát okozó,
- AL2: a légi jármű veszélyes hibaállapotát okozó,
- AL3: a légi jármű jelentős hibaállapotát okozó,
- AL4: nem megjelölt hibaállapotot okozó,
- AL5: a légi jármű kisebb hibaállapotát okozó.

Az adott megbízhatósági kategóriához a teljes életciklus folyamatban követelményeket ír elő. Rögzít néhány architektúrális megfontolást, amelyekkel a hibák hatása befolyásolható, vagy a hibák észlelhetők és a rendszer válaszaival kezelhetők: [9]

- részekre osztás,
- diverz kialakítás,
- safety monitoring.

Egy ehhez hasonló, másik releváns szabvány az **ED-153** (Guidelines For ANS Software Safety Assurance). Az ED-153 az ANS szoftverek biztonságával foglalkozó szabvány. 4 SWAL (SoftWare Assurance Level) szintet különít el az egyes szoftverekhez. Ennek meghatározási módszertanát is ismerteti; a szoftverek összes lehetséges hibájához vizsgálendő az okozott veszélyeztetés és a következmény súlyossága és gyakorisága, ez alapján egy mátrixból előállítható az egyes veszélyek SWAL szintje (1. táblázat).

1. táblázat: A hatások súlyossága és gyakorisága alapján előálló SWAL szintek [10]

Hatás súlyossági osztálya Az ilyen hatás kialakulásának valószínűsége	1	2	3	4
	Nagyon lehetséges	SWAL1	SWAL2	SWAL3
Lehetséges	SWAL2	SWAL3	SWAL3	SWAL4
Nagyon valószínűtlen	SWAL3	SWAL3	SWAL4	SWAL4
Rendkívül valószínűtlen	SWAL4	SWAL4	SWAL4	SWAL4

A szoftver által okozott lehetséges veszélyek közül a legalacsonyabb SWAL szint (legszigorúbb) felel meg a szoftver SWAL szintjének. A SWAL szintekhez definiálja a vizsgálat mélységét, amely lehet szoftverkövetelmény, architektúrális kialakítás vagy a forráskód akár soronkénti vizsgálata. Ezután egy életciklus modellt állít fel, az egyes szakaszokban fellépő feladatok SWAL szinthez kötésével.

Ezek a SWAL szintek megfeleltethetők az IEC61508 által alkalmazott SIL (Safety Integrity Level) szinteknek. A különböző légiközlekedési és az általános 61508 közötti átjárhatóságot a 2. táblázat szemlélteti.

2. táblázat: Szoftver szabványok kapcsolata [10]

ED109/DO278 Assurance Level	ED-153 Software Assurance Level	RTCA/DO178B SW Design Assurance Level	IEC61508 (magas követelményű rendszerekre)
AL1	SWAL 1	DAL A	SIL 4
AL2	-	DAL B	Nem megfeleltethető
AL3	SWAL 2	DAL C	SIL 3
AL4	SWAL 3	Nem megfeleltethető	SIL 2
AL5	SWAL 4	DAL D	SIL 1
AL6	Nem megfeleltethető	DAL E	Nem megfeleltethető

Az ED-153 IEC61508 szabványtól való különbözőségének oka

- az általános szabvány egyedi változatának hiánya az ANS-hez,
- az IEC61508 szabvány 3. részének A. és B. mellékletében található táblázatok különböző értelmezései, ahol egyes tevékenységek "R" jelzéssel szerepelnek: ajánlott vagy "HR": erősen ajánlott.

A gyakorlatban a légiforgalmi szolgáltatók (ANSP) nem rendelkeznek a szigorúbb biztonságintegritási szintek alkalmazásához szükséges képességekkel, így sokszor a kockázatcsökkentési tényezőkkel együtt állapítják meg azt.

2. A légiforgalmi irányítás automatizálása

A kidolgozott automatizálási megoldás megalapozásaként a fejezet a légiforgalmi irányítás automatizálására történt (sikertelen) kísérletek áttekintését és a légiforgalmi irányításban alkalmazott automatizálási alapelveket tekinti át.

2.1 Korábbi automatizálási projektek

A légiforgalmi irányítás jelenleg a támogató tool-ok egyre szélesebb körének ellenére is humán alapú, bár a múltban számos próbálkozás történt az automatizálásra, melyek közül néhányat a 3. táblázat tekint át.

3. táblázat: A korábbi automatizálási projektek áttekintése [11]

Projekt	Szervezet	Év	Algoritmus	Eredmények	Problémák
AERA (Automated En-Route Air Traffic Control)	MITRE (FAA)	1981	„Gentle-Strict” (GS) csak horizontális elkülönítés, az egyik légi jármű kiterésével.	Az utód projektből későbbi modernizáció.	Algoritmus hiánya a 3 vagy több elemű halmoz feloldására és globális optimumra.
ARC2000 (Automatic Radar Control for the 21st Century)	EURO-CONTROL	1994	Konfliktus csoportok kezelése 20-30 perces időablakban, 4D repülési „csövek” allokálásának optimalizálása.	Hozzájárult néhány támogató eszköz fejlesztéséhez.	Megoldás hiánya a repülési útvonalak globális optimumára, nagy sűrűségre, bizonytalanságra.
SAINTEX	CENA (Francia Léginavigációs Tanulmányi Központ)	1992	„Detection/Resolution” – az irányító viselkedésének reprodukciója, és 4D algoritmus. Előre megírt szabályok.		Csak alacsony sűrűségű forgalomra alkalmas, külön algoritmus 2 légi jármű konfliktusának feloldásához.
FREER (Free-Road Encounter Resolution)	EURO-CONTROL	1995	A repülési szabályok kibővítése prioritizálással. Konfliktus feloldása légi jármű fedélzetén.	Az irányítói munkaterhelés csökkentése (az elkülönítés biztosítását részben a személyzetre bízva).	Nem automatizálási projekté alakult (COSPACE Project, 2003).
	ONERA (Francia Nemzeti Repülési Kutatóintézet), CENA	1994	Taszító erők módszere		A pilóta és az irányító rendszerben maradása. Csak esettanulmányok vizsgálatán alapul. Más master rendszer szükséges a sűrűsödés elkerüléséhez. Globális optimum hiánya.
Autopace	Európai Unió	2016		Kockázat értékelési mátrix és kockázat elfogadási mátrix javaslása.	

2.1.1 AERA - Automated En-Route Air Traffic Control

Az FAA által támogatott amerikai kutatás volt, amely 1981-ben zárult. Az első fázis lehetővé tette a légitársaságok repülési vonalának a pilóták szándéka szerinti tervezését úgy, hogy a sztetenderek elkülönítési minimumok vagy áramlási korlátozások sérülése detektálható legyen. Ez volt az első eszköz az irányítói döntéshozatal támogatására, de a konfliktus feloldására vonatkozó javaslatot még nem nyújtott. [11] [11]

A második fázis már tartalmazott gépi ajánlásokat a konfliktus feloldására, és az irányítók közötti koordináció támogatására. Azonban ebben a fázisban is a végső felelősség a légitársaságok közötti elkülönítést illetően az irányító maradt, amely csak a harmadik fázisban került a gépre. [11] [11]

A harmadik fázis három, egymásra épülő szintből állt, az automatizált elkülönítési funkció a légitársaságok között páronként biztosított az elkülönítést, egy másik modul ennek a globális kontextushoz való igazodásáról gondoskodott és a harmadik modul légtér gazdálkodási tervező funkciókkal megakadályozta a forgalom oly mértékű sűrűségét, amelyet nem tudna kezelni az előző modul. [11] [11]

Az automatikus elkülönítési funkciót a „Gentle-Strict” (GS) algoritmus biztosította, a vízszintes keresztezésből eredő konfliktusok esetében oldalra történő kitérés alkalmazásával: az egyik légitársaság egy „gyenge” („gentle”) utasítást kapott oldalra történő kitérésre, a másik légitársaság pedig egy „szigorú” („strict”) utasítást az útvonalának követésére. A többi szintre nem dolgoztak ki megoldást, az FAA pedig elvonta a támogatást. [11] [11]

2.1.2 EUROCONTROL – ARC2000

Az ARC2000 projekt célja a teljes európai légtér útvonalirányításának automatizálása volt. A repülési útvonalakat úgy modellezték, mint 4 dimenziós „csövek”: az első három változó a légitársaság térbeli pozíciója, a negyedik az idő, a mérési pontatlanságok miatt ezt a görbét transzformálják „csővé”. Így az elkülönítés az ilyen „csövek” egymás metszése nélküli megalkotását jelenti. Az első légitársasághoz, amely belépett a légtérbe az optimális „csövet” allokálják, az ezt követő légitársaságok útvonalának allokálásakor pedig az előzőeket fix peremfeltételnek tekintik, a már kiosztott útvonalakat nem módosítják. Ha egy légitársaság módosítást kezdeményezett, akkor egyeztetnie kellett az összes többi útvonal figyelembe vételével. A módszer gyengesége a robusztusság, hiszen előfordulhat, hogy egy vagy több légitársaság az időjárási körülmények miatt nem képes követni az útvonalát, amely kaotikus állapotot eredményezhet. [11][13]

A projekt előrehaladtával a teljes repülési útvonal allokálása helyett 20-30 perces időablakokban történő konfliktus feloldással próbálkoztak, az optimum keresésében pedig a légitársaságokat prioritizálták. Az algoritmust tesztelték valós forgalmi adatokon. Az algoritmus problémája a globális optimum elérése. A projektet végül jóval 2000 után állították le. [11][13]

2.1.3 SAINTEX Projekt

A Francia Léginationavigációs Tanulmányi Központ (CENA) projektje eredendően az éjszakai alacsony forgalmú időszak útvonalirányításának automatizált megoldását célozta meg. Ha a légitársaság egy adott szintet tartva repül (nem emelkedik vagy süllyed), akkor a „Detection/Resolution” algoritmus kezeli. Ez az emberi irányító viselkedésének reprodukálása; a konfliktusokat a légitársaság útvonalának 10 perces

extrapolációjával kutatták, a feltárt konfliktusokat kategorizálták (pl. útvonalak által bezárt szög, relatív sebesség stb. alapján), majd a kategóriákhoz előre meghatározott intézkedéseket alkalmazták. Csak két légitársaság közötti konfliktus feloldására volt képes. Más esetekben az ARC2000 algoritmusához hasonló 4D algoritmus kezeli, amely egy konfliktus mentes repülési útvonalat generált minden a szektorba belépő légitársaság számára, melyet pontok és vertikális feltételek halmozása ad meg. Az elképzelés hátránya, hogy külön speciális algoritmust igényel a két légitársaság közötti konfliktus feloldása. [11][14]

2.1.4 FREER Project

Két külön megközelítést fogalmazott meg. FEERER-1: ha a légitársaság teljesen autonóm alacsony forgalmi sűrűségű légtérben repül, akkor nincs szükség földi infrastruktúrára. A konfliktus feloldás és forgalom előrejelzés 6-8 perces időablakban történik. Négyenél több légitársaság konfliktusa esetén nem garantálható a megoldás. Ezen feltétel teljesülését biztosítja a FREER-2, amely 15-20 perces időablakban, pre-taktikai filterként földi infrastruktúrát használva megelőzi a légtér telítődését. [11][15]

A FREER-1 a meglévő, korábban vizuális repülésekre vonatkozó repülési szabályokat (rules of air) módosította, hogy feloldják a bizonytalanságokat prioritizálással (pl. transzponder kód alapján). A fedélzeti konfliktus feloldó algoritmusok alapját az ARC2000 projektből fejlesztett tool, a HIPS (Highly Interactive Problem Solver) adja, amely lehetővé teszi a konfliktus zónák (NoGoZones) valós idejű vizualizációját – melyhez a légitársaság pályájának ismerete szükséges. [11][15]

A FREER-2 tartalma módosult, amikor szükségessé vált nagy forgalomsűrűségű légtérekben a két járművet érintő konfliktusok feloldását részben ide szervezni. Ehhez kell a légitársaság felszerelése ASAS (Airborne Separation Assurance System) berendezéssel. [11][15]

Az alkalmazott módszer, a taszító erők módszere a műveletek koordinációját az ágensre (légitársaságra) ható erők kombinációjához rögzíti: [11][15]

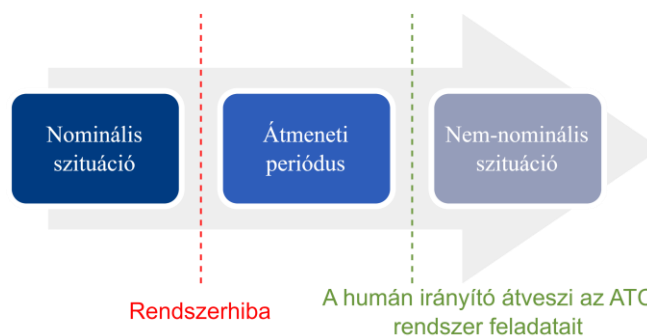
- vonzó erők: a légitársaságot segíti a céljának elérésében (pl. jeladó a végcélnál),
- taszító erők: közeli, veszélyes akadályok (pl. légitársaság, tiltott légtér) elkerülését teszik lehetővé,
- csúszó erők: akadályok kikerülését teszik lehetővé (pl. vízszintes síkban jobbra vagy balra, az optimális irány a cél megközelítésének kedvez).

Több, mint két légitársaságot érintő konfliktus esetére az erők összeadásával található megoldás. Csak esettanulmányok vizsgálatán alapul. Csak 4-10 perccel konfliktus előtt képes azt feloldani, így másik rendszer szükséges a forgalom telítődésének megakadályozására. [11][15]

Az emberi pilóták rendszerben maradása mellett a felsugárzott utasításoknak az ember számára is érthetőek kell legyenek. Nem kérhető például a sebesség/irány végleges megváltoztatása. Így a módszerben légitársaság pályájának modellezése újra gondolandó. A globális optimum elérése nem biztosított. [11][15]

2.1.5 Autopace

A projekt 2016 és 2018 között futott, az Európai Unió Horizont 2020 kutatási és innovációs programja keretében a SESAR Joint Undertaking támogatta. Az automatizáláshoz két, egy jobban és kevésbé automatizált scenáriót vettek figyelembe. A rendszer és kapcsolatainak leírása után módszertant dolgoztak ki a veszély és kockázatelemzéshez. A rendszerben a meghibásodásokat illetően két állapotot különböztettek meg az 5. ábra szerint. [16]



5. ábra: Az Autopace projektben vázolt meghibásodási állapotok [16]

A projektben három nem-nominális szituációt vettek figyelembe: [16]

- konfliktus detektálás és feloldás tool hiba,
- komplexitás menedzsment tool hiba,
- rendszer által támogatott koordinációs tool.

2.2 Az automatizálás alapelvei

1994-ben az FAA kérésére megalakuló „Panel on Human Factors in Air Traffic Control Automation” két nagyszabású tanulmányban foglalta össze az automatizálás és a légiforgalmi irányítás fejlődésének tárgykörét. A tanulmány állásfoglalása szerint az automatizálási igényt a kapacitás növelése a biztonság szintjének feláldozása nélkül hívja életre; automatizáláshoz szükséges technológia már rendelkezésre áll, azonban elutasítják azt a gondolatot, hogy önmagában ez a tény okot ad annak használatára. Ez akkor mérlegelhető, ha az ilyen technológia képes támogatni a rendszer vagy az emberi kezelő jogos igényeit. A humán központú automatizálásban az automatizálandó területet az határozza meg, hogy milyen emberi gyengeségeket szükséges kompenzálni és milyen emberi erősségeket lehet kihasználni. [17][18]

Az említett tanulmány az automatizálás definícióját a következőképp határozta meg: [18]

„Olyan eszköz vagy rendszer, amely (részben vagy egészben) megvalósít egy olyan funkciót, amelyet korábban (részben vagy teljesen) emberi kezelő végzett.”

2.2.1 Az automatizálás szintjei

Az automatizált funkciók körének bővülésével fontossá válik a rendszer automatizáltsági szintjének egzakt formában történő leírása. Az első erre irányuló osztályozást Sheridan [19] készítette, az automatizálást 10 szinten leírva (6. ábra).

Alacsony	1.	A számítógép nem nyújt segítséget, az embernek kell mindent elvégeznie.
	2.	A számítógép cselekvési alternatívák teljes készletét kínálja fel, és
	3.	leszűkíti a választékot néhányra, vagy
	4.	javasol egyet, és
	5.	végrehajtja ezt a javaslatot, ha az ember jóváhagyja, vagy
	6.	az embernek korlátozott időt hagy a vétőzésre az automatikus végrehajtás előtt, vagy
	7.	automatikusan végrehajtja, majd szükségszerűen tájékoztatja az embert, vagy
	8.	csak a végrehajtás után tájékoztatja az embert, ha az kéri, vagy
	9.	a végrehajtás után tájékoztatja az embert, ha a számítógép úgy dönt.
Magas	10.	A számítógép mindent eldönt és önállóan cselekszik, figyelmen kívül hagyva az embert.

6. ábra: Az automatizálás szintjei [19]

Ez a skála legjobban a döntéshozatalt és művelet választást írhatja le, így bevezethető egy ezzel párhuzamos skála az információ automatizáltságára (7. ábra) [18]. Célszerű az információ szerzés (érékelés) és a művelet kiválasztás (beavatkozás) külön kezelése ember-gép rendszerek esetében, ahol az automatizálás felső határainak specifikációi a feladat bizonytalansági szintjétől függenek.

Információgyűjtés és integráció	Döntés és művelet választás	Művelet végrehajtás
Automatizálási szint	Automatizálási szint	vagy-vagy
Magas Alacsony	Magas Alacsony	Auto vagy Manuális

7. ábra: Az automatizálás szintjei skálázva [18]

Az automatizálás magasabb szintjein a döntés és művelet választás egyre kisebb szabadságfokot enged az embernek. A 2 – 4 szintek létrehozhatók úgy, hogy az ember manuálisan is végrehajthassa a javasolt műveletet (pl. engedély kiadás szóban) vagy automatizáltan (pl. engedély kiadása data linken keresztül). A manuális opció nem elérhető magasabb szinteken.

Ehhez hasonló megközelítést dolgozott ki kifejezetten a légiforgalmi irányításra alkalmazandóan a SESAR (Single European Sky ATM Research) kereteiben a Safety and Airspace Regulation Group irányadó anyagjában közölt táblázatában; a légiforgalmi irányítás funkcióinak automatizáltságát osztályozva (4. táblázat).

4. táblázat: Az automatizálás szintjei a Safety and Airspace Regulation Group szerint [20]

Automatizálás növekedése		Információtól a beavatkozásig →			
		A információ gyűjtés	B információ elemzés	C döntéshozatal és beavatkozás választás	D beavatkozás végrehajtása
	A0 emberi információ gyűjtés	B0 emlékezet alapú információ elemzés	C0 emberi döntéshozatal	D0 emberi beavatkozás és irányítás	
	A1 eszköz által támogatott információ gyűjtés	B1 eszköz által támogatott információ elemzés	C1 eszköz által támogatott döntéshozatal	D1 beavatkozás végrehajtása eszköz támogatásával	
	A2 információ gyűjtés alacsony szinten automatizált támogatással	B2 információ elemzés alacsony szinten automatizált támogatással	C2 automatizált döntéshozatal	D2 beavatkozás eszköz támogatásával lépésről lépésre	
	A3 információ gyűjtés közepes szinten automatizált támogatással	B3 információ elemzés közepes szinten automatizált támogatással	C3 rugalmasan automatizált döntéshozatal	D3 alacsony szinten támogatott szekvenciális végrehajtás	
	A4 információ gyűjtés magas szinten automatizált támogatással	B4 információ elemzés alacsony magas automatizált támogatással	C4 alacsony szinten automatizált döntéshozatal	D4 magas szinten támogatott szekvenciális végrehajtás	
	A5 teljesen automatizált információ gyűjtés	B5 teljesen automatizált információelemzés	C5 magas szinten automatizált döntéshozatal	D5 alacsony szinten automatizált szekvenciális végrehajtás	
				D6 közepes szinten automatizált szekvenciális végrehajtás	
				D7 magas szinten automatizált szekvenciális végrehajtás	
				D8 teljesen automatizált szekvenciális végrehajtás	

2.2.2 Emberi tényező

Az automatizálás segíthet az emberi irányító gyengeségein keresztül a rendszerbe vitt veszélyek kiküszöbölésében, ugyanakkor, ha az embernek továbbra is van szerepe az automatizálás után, akkor ez újfajta veszélyeket jelent a rendszerben Megállapíthatók az emberi észlelés határai, melyek az automatizált rendszerrel megcélozhatók: [17]

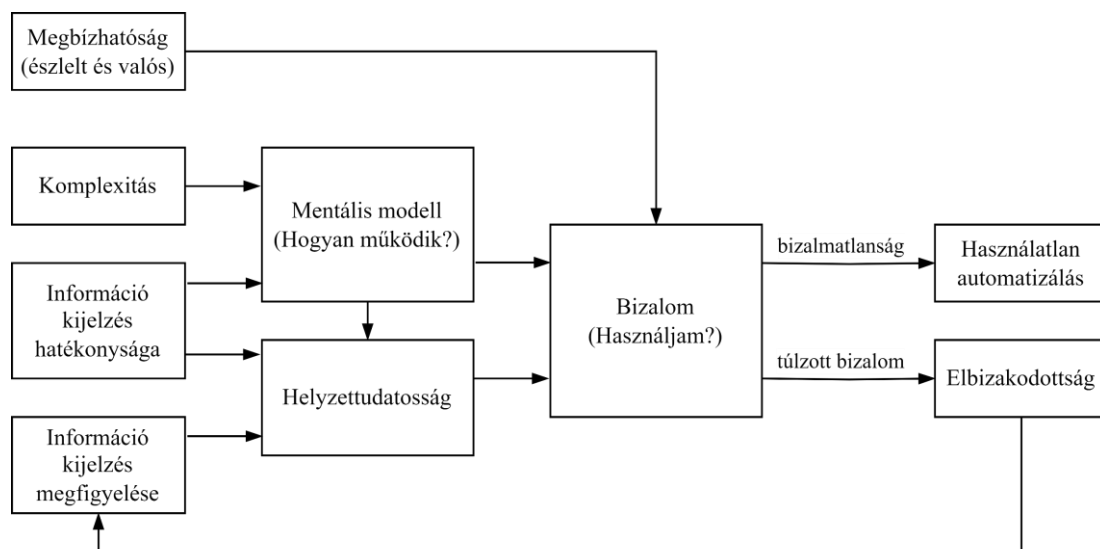
- a váratlan (ritka) események kevésbé hatékony feldolgozása,
- a feldolgozást gátolja a képernyőn előforduló zavar, zsúfoltság,
- csak korlátozottan képesek előre jelezni a jövőbeli forgalmi állapotokat a több, heterogén légi járművel (4D trajektória extrapoláció nehézsége).

Ebből levonható néhány következtetés: [17]

- a kommunikáció alapját a beszélő és hallgató közötti megosztott helyzet tudatosság adja, ezért ez fenttartandó és erősítendő megjelenítési technológiákkal és képzéssel,
- az adott szektor térbeli és eljárásbeli ismerete az irányító állandó tudásanyagának nagy részét képezi,
- az irányítói döntéshozatal javítására olyan stratégiák szükségesek, melyek időkritikus környezetben hatékonyak.

Bizalom

Már korai szakirodalmak is megállapították, hogy az olyan automatizált rendszerekben, amelyek emberi tényezőt tartalmaznak, és bennük ember-gép teammunka zajlik, nem elhanyagolható az ember hozzájárulása a rendszer működéséhez [21], különösen különleges automatizálási struktúrák esetén. Ez foglalja keretrendszerbe a 8. ábra.



8. ábra: Az emberi teljesítmény modellje a hibára adott válasz alapján [18]

Az automatizált rendszerben az emberi teljesítményt a hibákra adott válasz határozza meg. Az emberben kialakuló bizalom függ a rendszer megbízhatóságától, amely elkülöníthető, mint tényleges érték, ez a megbízhatósági számításokból nyerhető, valamint az emberi felhasználó által észlelt érték. A bizalmat elsősorban az észlelt érték befolyásolja. Például olyan automatizálás esetén, amely nagyon magas szintű, de nem tökéletes megbízhatósággal rendelkezik, az irányító úgy hiheti, hogy már nem szükséges felügyelnie azt, így a hiba észrevétlen maradhat; vagy olyan automatizált eszköz esetén, amely nagyon pontos és hasznos, azonban az irányító bizalmatlan vele szemben, nem kerül használatra. [18]

A bizalom függ az emberben kialakuló mentális modelltől. A mentális modellre hatással van az automatizmus komplexitása, azáltal, hogy mennyire érthető, átlátható a működése. Ez elősegíthető az információk kijelzésével; a hatékony információ kijelzés (illetve annak megfigyelése) és a mentális modell hozzájárul a helyzet tudatosság kialakulásához. Ezek e tényezők alapjaiban határozzák meg az ember által az automatizmusba vetett bizalmat. Így kialakulhat túlzott bizalom, amely egyfajta önelégültséghez vezet, ezzel befolyásolva a rendszer használatát az információ kijelzés figyelemmel tartása tekintetében. Kialakulhat a rendszerrel szembeni bizalmatlanság is, amely az automatizmus használatának mellőzéséhez vezethet. [18]

Az automatizált rendszerekben új hibamódok különíthetők el, ha az irányító automatizációról alkotott mentális modellje nem egyezik annak valóságos funkcionalitásával. Ez az „*automation surprise*”, automatizálási meglepetés, a modern automatizálási rendszerek tervezéskor és a Humán Faktor elemzésekkor fontos szempont. [22][23]

Képességromlás

Az automatizmus bevezetésekor elkerülhetetlen, hogy az emberi irányítók olyan képességei, amelyekre korábban szükség volt, de az új rendszerben nem, vagy csak ritkán szükségesek, romlani fognak. A lényegi kérdés azonban az, hogy az így elvesztett képességek mennyire szükségesek az új rendszerben, milyen hatással bírnak a rendszer biztonságára. Így szétválaszthatók azok a helyzetek, amikor a képesség elvesztése hatással van a biztonságra, és amikor nem. Általában az információszerzéssel kapcsolatos automatizálások során úgy tekinthető, hogy a képesség elvesztése nem befolyásolja hátrányosan a rendszert; a munkaterhelés csökkentésén keresztül a hatékonyság és a biztonság növelése érhető el. A döntéshozó és beavatkozó automatizmusok esetében azonban a magas szintű kognitív funkciók romlása léphet fel. Ez kompenzálható úgy, ha egy időre visszakerül az irányítás az emberhez, ezzel a biztosítható a feladatra fordított figyelem és tudatosság; vagy kiküszöbölhető olyan rendszerek tervezésével, amely olyan magas megbízhatósággal rendelkezik, hogy nem támaszkodik az elvesztett képességre még rendszerhiba esetén sem. [18][21]

Humán Faktor elemzések

Annak megállapítása után, hogy a modern ipari irányítási rendszerekből az emberi tényező nem küszöbölhető ki teljesen, az automatizált rendszerek valójában ember-gép rendszerek, így elengedhetetlenné válik az emberi hiba vizsgálata. Az ilyen rendszerek ma már összetett szervezeti háttérben működnek, ezért a rendszer biztonságának vizsgálatakor különböző vállalati, szervezeti aspektusok vizsgálata is szükséges. Ezen a területen külön minőségirányítási és biztonságirányítási rendszerek léteznek. Ezeket abból a célból hozták létre, hogy a szervezeti háttérben zajló folyamatokon, gyakorlatokon keresztül csökkentsék a hagyományos értelemben, a rendszerben lévő emberi irányítóhoz köthető emberi hiba valószínűségét. A biztonságirányítási (SMS) rendszerek követelményeit ISO szabványok rögzítik.

Az emberi tényező biztonsági elemzésére alapvetően két megközelítés különíthető el; a Human Factors (HF) és a Human Reliability Analysis (HRA).

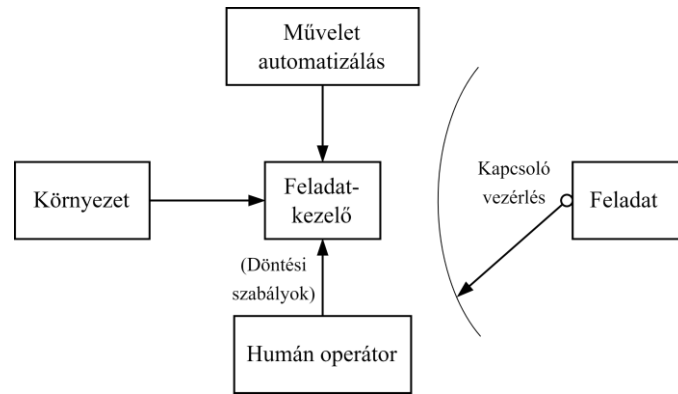
A Human Factor Boring et al. szerint definíció szerűen lehet az ember és technológia kölcsönhatásának vizsgálata. Új rendszerek tervezésekor empirikus adatok (pl. munkaterhelés, helyzettudatosság, stb.) alapján azonosítja a technológiai rendszer azon területeit, amelyek nagymértékű kitérttséget mutatnak az emberi tényezőnek, azaz ezeken keresztül az emberi komponens képes a rendszer biztonságának veszélyeztetésére [24].

A kockázatelemzések során az emberi komponens megbízhatóságának értékelésére a Human Reliability Assessment HRA módszerek valószínűség alapú kockázat értéket eredményeznek, azonban a már létező rendszerből indulnak ki. A HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) módszer ötvözi a HF és HRA megközelítést, az emberi megbízhatatlanságának hatását vizsgálja és a rendszer tervezését optimalizálja [25].

2.3 Adaptív automatizálás

Az automatizálás, és azon belül a légiforgalmi irányítás automatizálása számos problémát von maga után, melyeket már a múlt században is megállapítottak [21], azonban még modern tanulmányok is foglalkoznak a megoldási lehetőségeikkel. A nehézségek azonosításakor a kiindulás egy magas szintű automatizálás elképzelése, melyben az emberi irányítónak felügyeleti szerepe van. A biztonság elérése érdekében az ember folyamatosan megfigyeli a rendszer működését, észreveszi annak hibás működését és szükség esetén manuálisan beavatkozik, kezelheti a vészhelyzeteket stb.

Már korai tanulmányok is rámutattak az emberi irányító passzivitásából eredő teljesítményromlására [21]. Ez a szakirodalom által *out-of-the-loop* néven hivatkozott jelenség. Ehhez [26] egy teljesítményromlási modellt is kidolgozott [27] pedig megállapította, hogy ha az irányító a rendszerben marad, „in-the-loop”, akkor nagyobb hatékonysággal végzi a megfigyelést. Így született meg az adaptív automatizálás ötlete, amelynek vázlatát az 1. ábra mutatja.



9. ábra: Zárt hurkú adaptív irányítás [29]

A modellben a felmerülő feladatokat egy adaptív logika allokálja az emberi irányító és az automatizmus között. A modern kutatások ezen adaptív logika (az 1. ábrán Feladatkezelő blokként jelzett) megvalósításával foglalkoznak. [30] agy-számítógép interfészt készített EEG berendezés használatával, feladatok allokálásával megfelelő szinten tartva a légiforgalmi irányítók agyi aktivitását. Ígéretes módszer a konvolúciós neurális hálók alkalmazása, amellyel [31] valós forgalmi szituációban képes megjósolni az irányító döntéseit egyéni szinten, így sikerült megbízható konfliktus feloldó algoritmust nyújtani.

Fontos az adaptív és az adaptálható automatizálás közötti különbség megállapítása. Az adaptálható automatizmusban az emberi irányító végzi a feladatallokálást, azaz maga állíthatja be, hogy az adott feladatot el kívánja-e végezni, vagy az automatizmusra bízta. Ez jelentheti egyszerűen az automatizmus ki/be kapcsolását, vagy valamilyen mód választását, így változtatva az automatizálási szintet. Ilyen megoldások találhatók akár a személygépjárművekben, akár a repülőgép fedélzetén is. Adaptív automatizálás esetén az adaptív logika működésére nincs közvetlen befolyással az emberi irányító (nem ő kapcsolja), hanem valamilyen gépi algoritmus alapján vagy külső emberi behatásra (pl. supervisor) történik, amelynek lehet bemenete az emberi irányító aktuális állapotára vonatkozó megfigyelés vagy számítás (pl. minkor kapott utoljára feladatot). [18]

Elméleti szinten az adaptív automatizálást kevésbé érinti az emberi hiba, mint a statikus automatizálást, az emberi szereplő „in-the-loop” tartásán keresztül [33]. Az adaptálható automatizálásban azon keresztül, hogy az emberi irányító maga állítja be a kívánt automatizálási szintet biztosítható, hogy magas

fokon tisztában legyen a rendszer állapotával, aktuális működésével, míg adaptív forma esetén ez rejtve maradhat előtte, ezzel negatívan befolyásolva a rendszerbe vetett bizalmat és a hibák észlelésének képességét. [18]

Az adaptív automatizálási struktúra más iparágakban is jelentős szerepet kapott, léteznek ipárgspecifikus módszerek az ilyen rendszerek tervezésére és tanúsítására, pl. a U.S. Nuclear Regulatory Commission által kiadott HSI Review Guidance for Automation Systems, amely külön figyelmet fordít a kijelzésekre, riasztásokra, értesítésekre, státusz információkra [34]

Az adaptív és adaptálható automatizálás különböző formáinak hatékonyságát számos tanulmányban kísérleti úton vizsgálták. [35] kísérletében azt tapasztalta, hogy habár az irányítók teljesítményében nem volt különbség, de az adaptálható automatizálást használók nagyobb magabiztosságra tettek szert a rendszer kezelését illetően. [36] kísérletében időalapú feladatallokálást végeztek, többfeladatú repülőgép fedélzeti szimulátorban (multiple-task flight simulation). A szimuláció 90 perces blokkokban zajlott, melynek közepén 10 perc időtartamra az irányítóhoz került a korábban automatizált, hajtómű státusz ellenőrzési feladat. Az eredmények szerint a kézi feladatról való visszatérés utáni időszakban jelentősen jobb volt az automatizálás hibáinak észlelése, mint az azt megelőző szakaszban. [37] kísérletében alacsony, közepes és magas megbízhatóságú adaptálható automatikát használó irányítókat vizsgáltak, akik öt különböző automatizálási szint közül választhattak szabadon. Az eredmények szerint az alacsonyabb megbízhatóságú rendszert használók automatikába vetett bizalma alacsonyabb volt, mint a magasabb megbízhatóságú használóké, azonban ez nem mutatott összefüggést azzal, hogy mennyire támaszkodtak az automatikára. Továbbá a megbízhatóság csökkenésével romlott a diagnosztika sebessége és a prospektív memória. [38] a HAT (Human Automation Teaming) megvalósíthatóságát illetően számos iparágból érkező szakértővel készített interjút. A HAT hátráltató tényezői között olyanokat állapított meg, mint az emberi irányítón nyugvó felelősség, az automatizmus dinamikus működése, non-verbális jelek megértése.

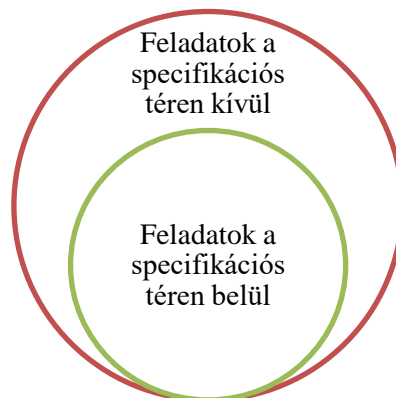
3. Az automatizált irányítás koncepciója

A fejezetben kidolgozásra kerül az automatizált irányítás új koncepciójának architektúrája és matematikai modellje.

3.1 Rendszerarchitektúra

A légiforgalmi irányítás rendszere igen komplex rendszernek tekinthető, több részrendszere osztható és azokban nagy számú elemet tartalmaz, melyek között összetett kapcsolatok állhatnak fent. Mindemelllett biztonságkritikus ágazatról van szó, melyben például a vasúti közlekedéssel ellentétben nem értelmezhető biztonsági állapot, energiaminimum, hanem az üzem biztonságát annak folytonosságával lehet elérni.

Automatizáláskor a korábban emberi irányítón lévő felelősség átkerül annak tervezőjére. Így látható, hogy a legnagyobb kihívás az automatizálandó funkciók specifikációja. A biztonságkritikus rendszerek automatizálásának verifikációjakor ellenőrizhető, hogy a létrehozott rendszer megfelel-e a specifikációban foglaltaknak, azt sokkal nehezebb ellenőrizni, hogy a specifikáció valóban teljes volt-e, minden részét lefedi-e annak a funkcionális térnek, amelyben az automatizmust üzemeltetni kívánják. Ezt a 10. ábra illusztrálja.



10. ábra: A specifikáció teljességének problémája

A specifikáció teljességének problémája nem csak a gépi rendszereket érint, hanem a humán alapú irányítási rendszert is; a humán irányító képzése során. A képzési anyag teljessége párhuzamba állítható az automatizált rendszer specifikációjával, hiszen a humán irányító is elvben csak azokat a funkciókat képes a meghatározott biztonsági szinten ellátni, amelyre a képzése kiterjedt. Az, hogy egy szituáció kívül esett a képzésen vagy a specifikációs téren, abból nem szükségszerűen következik az, hogy a humán irányító ne tudná megoldani a tudását és a korábbi tapasztalatait felhasználva, ugyanakkor egy hagyományos gépi rendszerben csak az előre definiált szituációk kezelése biztosított.

Így a javaslat megfogalmazásakor jelentős egyszerűsítést jelent, ha a specifikáció teljessége nem képez feltételt; csak egy kívánt specifikáció elkészítése szükséges, mely alapján megfelelő biztonsági szinten meg lehet tervezni és validálni egy automatizmust. Ennek következménye, hogy a rendszer üzeme során lesznek olyan események, amelyek kívül esnek ezen a specifikációs téren; ezek megfelelő kezelése miatt szükséges az emberi irányítót továbbra is a rendszerben tartani.

Az emberi irányítót a rendszerben tartva felmerül, hogy hogyan rontja a rendszer biztonsági szintjét, ha az ember képességei a csökkent gyakoriságú használat nyomán degradálódnak, vagy ha az automatizmusba vetett bizalom és a csökkenő munkaterhelés miatt kevésbé kíséri figyelemmel a rendszer üzemét így a helyzettudatossága romlik. Az olyan funkciók miatt, amelyek a specifikáción kívül esnek, és a humán résztvevőnek kell ellátnia, kulcsfontosságú, hogy az irányító megfelelő helyzetképpel és képességgel rendelkezzen. Ez biztosítható, ha a rendszer bizonyos feladatokat akkor is a humán irányítónak allokál, ha egyéként az nem esik kívül a specifikáción, és a rendszer képes lenne azt ellátni.

A rendszerben a humán és a gépi irányítás csapatban dolgozik. A gép ismeri a humán irányító modelljét, ez alapján feladatokat allokál neki, anélkül, hogy tudná, hogy mely okból kapja a feladatot:

- a humán munkaterhelés optimális szinten tartása: ne legyen túlzottan alacsony vagy túlzottan magas a munkaterhelés,
- a humán helyzettudatosság fenntartása,
- a gépi rendszer specifikációján kívül eső feladat, amelyről nem dönthető el, hogy kellő biztonsággal meg tudja-e oldani a gépi rendszer.

A 11. ábra a vázolt rendszer szemlélteti. Az ábrán bal oldalon megjelennek a végrehajtandó feladatok, amelyek az automatizmus funkcionális terén belül vagy kívül eshetnek – nagyobb arányban belül. Az elv egy kérdéses pontja, hogy mennyire dönthető el egyértelműen egy adott feladról, hogy kívül esik-e a specifikáción. A feladatok dinamikusan változóan tartozhatnak a specifikációba, bizonyos körülmények közt a feladatok végrehajtása kivezet a specifikációból. A feladatok egy feladat allokációs logikába futnak be, kivéve azok, amelyeket a gépi rendszer nem tud megoldani – a gyakorlati megvalósításban ezeket is ugyanaz a rendszer modul kezelné. Az ábra azt szemlélteti, hogy ezeknél a feladatoknál nem áll fent a döntés lehetősége. A maradék feladat alkalmas arra, hogy a feladat allokációs logikai egység kiválogasson belőle olyanokat, amelyekkel az irányítóról képzett modell alapján a helyzettudatossága és munkaterhelésének optimális szintje fenntartható. Az irányítóról alkotott modellre visszahat az irányító viselkedése – ez történhet közvetlen megfigyeléssel, vagy a kiosztott feladatok nyomán becslésekkel.

A gyakorlatban a légiforgalmi irányítás mindennapi feladatainak specifikációja viszonylag magas szinten elkészíthető, így ritkán adódnának olyan esetek, amelyek ezen a specifikációs téren kívül esnek, akkor viszont várhatóan komplex, nehéz helyzetekről lesz szó, ezért különösen fontos, hogy ilyenkor a humán irányító rendelkezésre álljon és magas megbízhatósággal oldja meg azokat.

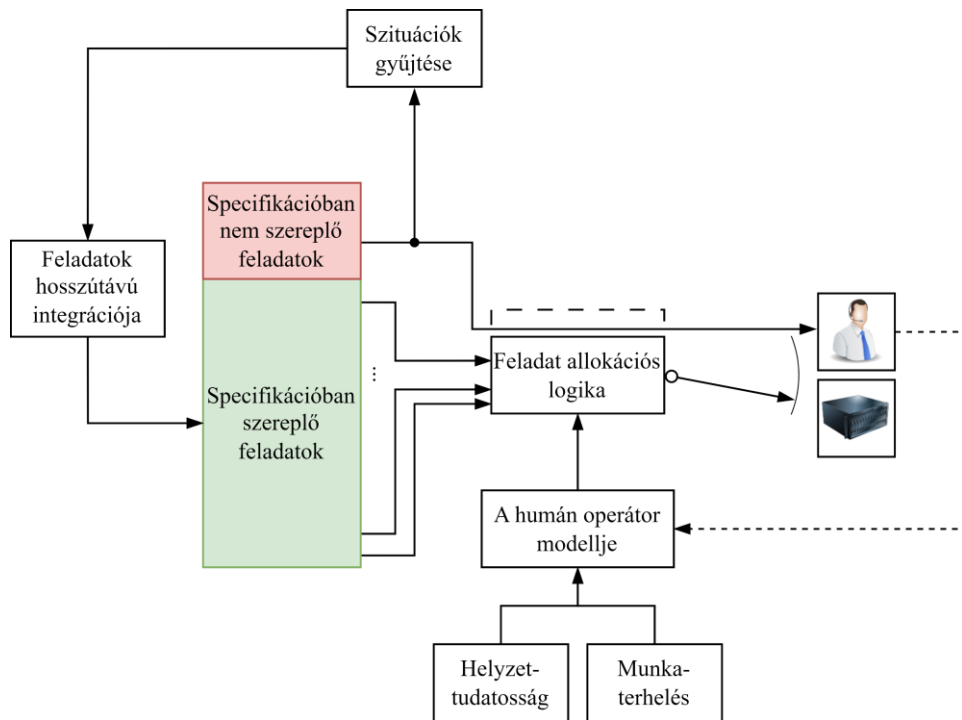
A rendszer fejlődése során specifikáción kívüli feladat érkezésekor azok összegyűjthetők és integrálhatók a rendszerbe, így bővítve a specifikáció funkcionalitását, és egy átmeneti időszak után hosszú távon akár a teljes automatizálás is megvalósítható. Ennek eredményeként a specifikáción kívüli új helyzetek egyre ritkábbá és egyre összetettebbé válhatnak, nehezebben kezelheti azokat a humán irányító.

A könnyen specifikálható funkciók esetében érdemes determinisztikus automatizálást megvalósítani, így könnyen megtalálható a biztonsági szintjüket garantáló biztonsági szabvány. A nem determinisztikus feladatok esetében a hagyományos automatizálással ellentétben mesterséges intelligencia alkalmazását lehet megfontolni az egyre komplexebb helyzetek kezelésére. Ekkor a specifikáción kívül eső feladat érkezésekor arra alacsonyabb automatizálási szinten ajánlást tesz a mesterséges intelligencia algoritmus, ezzel támogatva az irányítót. A mesterséges intelligencia megbízhatósági alkalmazása egyelőre

kidolgozatlan kérdés, a jelenlegi biztonsági szabványok nem alkalmazhatóak. A légiforgalmi irányításban dinamikusan fejlődő, új kutatási terület, melynek egyik élenjáró szereplője az EASA. [39]

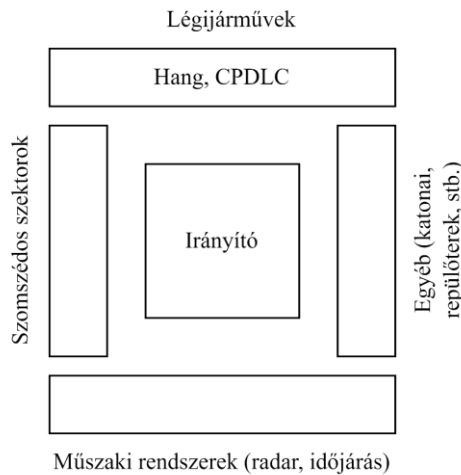
Az automatizálás ilyen módú megvalósításának előnye, hogy

- nem igényli a teljes jelenlegi irányítási struktúra újra alkotását; az egyes szektorokban bevezethető anélkül, hogy bármelyik másakra hatással lenne,
- nagyobb kapacitást biztosít, mivel az ember-gép páros feltételezhetően nagyobb forgalom kezelésére képes, mint az ember egyedül, így nagyobb szektorok is kialakíthatóak.



11. ábra Feladatmegosztás a javasolt rendszerben

A megvalósítás során kulcskérdésként jelentkezik az interfészek kialakítása. Jelen elv azzal a feltételezéssel került megfogalmazásra, hogy a gépi irányítás az emberrel teljesen megegyező interfészeket tud biztosítani, a külső résztvevő számára megkülönböztethetetlen, hogy kitől kapja az utasításokat, hasonlóan egy szektor határ átlépéséhez. A szükséges interfészeket a 12. ábra szemlélteti. A légitársasággal történő kommunikáció egy kézenfekvő formája a CPDLC (Controller Pilot Data Link Communication), azonban a gyakorlatban ez nincs elterjedt használatban. A különböző gépi hangkommunikációs technológiák kutatása másik tárgyterület feladata.



12. ábra: Az irányító funkció interfészei

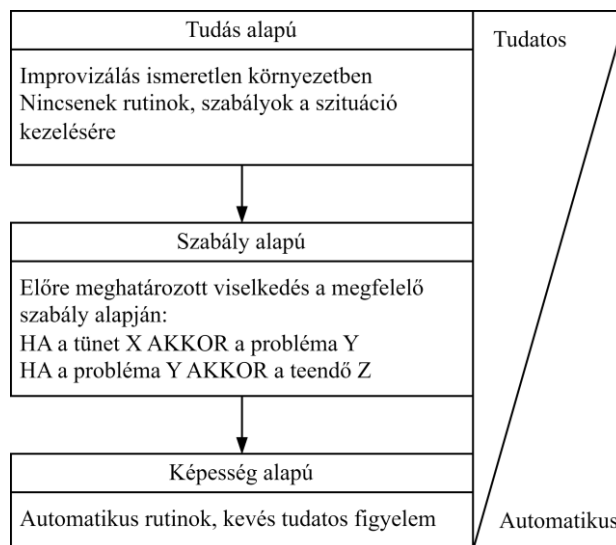
A bemutatott elv felvet néhány kérdést is, így a vészhelyzetek kezelését, amely első sorban a humán irányító feladatát képezné, főleg a rendszer korai időszakában. Fennáll annak is a veszélye, hogy a gépi algoritmus az általa megoldhatónak ítélt konfliktusok sorozatos feloldásával egy adott területen túl komplex forgalmi szituációt hoz létre, amely kezelése már az emberi irányítónak is nehézséget okozhat. A gépi irányítás tervezésekor ez szem előtt tartandó szempont.

3.2 Matematikai modell

3.2.1 A feladatok csoportosítása

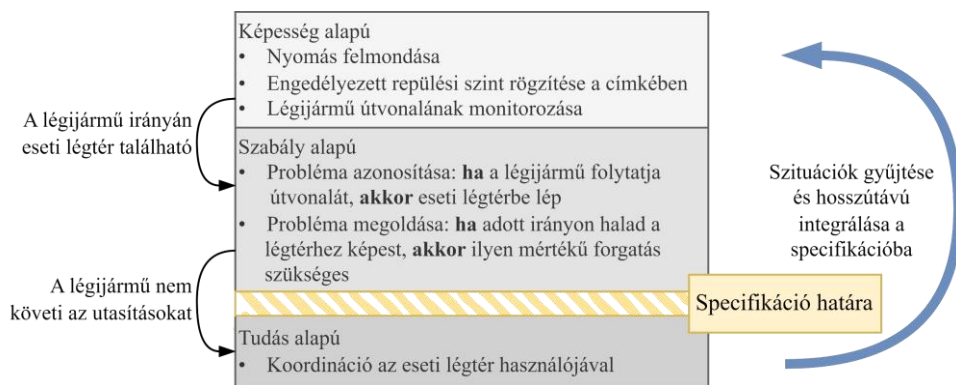
Az elv alapötlete, hogy nem lehetséges, és nem szükséges a valós működést teljes egészében lefedő specifikált feladatlista meghatározása. Azonban a lehető legszélesebb körű meghatározás szükséges ahhoz, hogy a feladat allokációs logika megfelelő mennyiségű választási lehetőséggel rendelkezzen.

A feladatok csoportosításának alapjául kézenfekvő választás a humán faktor. A [40] egy ilyen csoportosítási lehetőséget mutat be, amely a 13. ábrán látható. A csoportosítás magyarázatát egy példán keresztül a 14. ábra mutatja be.



13. ábra: A feladatok csoportosítása [40]

A rendszerben a felmerülő feladatok nem csoportosíthatók ilyen egyértelműen; elképzelhető, hogy egy-egy feladat egy bizonyos szituációban specifikáción belülre esik, egy másikban pedig kívülre. Egy-egy cselekvés az aktuális állapottól függően a specifikációs téren kívülre juttathatja a rendszert. A 14. ábra egy légi jármű eseményen keresztül mutatja be, hogy az ATC munkafolyamatban hogyan jelennek meg ezek a feladattípusok. A képesség alapú, rutin feladatok elvégzése közben az irányító éppen a légi jármű útvonalát ellenőrzését végzi, amikor észleli, hogy az irányán eseti légtér található. A szituáció átlép a szabály alapú térbe: az irányító azonosítja a problémát, ha a légi jármű folytatja útvonalát, akkor eseti légtérbe lép, majd azonosítja a szükséges szabályt, ha a légi jármű adott irányon halad a légtérhez képest, akkor milyen mértékű fordulásra szükséges utasítani a pilótát. Azonban a szituáció tovább léphet a tudás alapú térbe, például, ha a légi jármű személyzete nem követi az utasításokat, akkor az irányító kevésbé szigorúan rögzített szabályok mellett, a problémamegoldó képességét használva keres megoldást, például koordinál az eseti légtér használójával és értesíti a várható légtérsértésről. A specifikáció határa kézenfekvő módon eshet a tudás alapú tér elé, azonban megjegyzendő, hogy a szituációk rögzítésével és hosszú távú implementációjával a határ bővíthető. Továbbá a specifikáció határa sokszor nem egyértelmű, előfordulnak „sárga zóna” típusú feladatok, amelyek a körülményektől függően eshetnek a specifikációba, vagy azon kívül.



14. ábra: Példa a feladat típusának változására az ATC munkafolyamatban

5. táblázat: A feladatok csoportosítása

	Feladatok (f_i, g_i)	Munkaterhelés (ω)	Helyzetkép (L)
Képesség alapú	f_1	$\omega(f_1)$	$L(f_1)$
	f_2	$\omega(f_2)$	$L(f_2)$
	...		
Szabály alapú	...		
	f_n	$\omega(f_n)$	$L(f_n)$
Tudás alapú	g_i	$\omega(g_i)$	$L(g_i)$

Az 5. táblázat azt jelzi, hogy hogyan lehet a feladatokhoz paramétereket hozzárendelni. Mivel a paraméterekre elsősorban a feladatallokáláshoz van szükség, ezért praktikus a munkaterhelés és a helyzetkép értéket rögzíteni.

A paraméterek hozzárendelése nem egyszerű feladat. A munkaterhelés objektív mérőszáma lehet például a feladatra fordított időszükséglet. Erről az Eurocontrol által kiadott [41] szektor kapacitás makroszkópikus szintű formulája ad, ahol a munkaterhelés becslésének alapja, hogy jó közelítéssel minden ATC feladat az alábbi kategóriák egyikébe sorolható:

- rutin feladat,
- szintváltás monitorozása,
- konfliktus monitorozása.

Ezekhez társítandó

- feladat időtartama,
- feladat gyakorisága.

Így a munkaterhelés (WL) az (1) szerint:

$$WL = t_{FL} \cdot O_{FL} + t_{Cnf} \cdot O_{Cnf} + t_{Cl} \cdot O_{Cl} \tag{1}$$

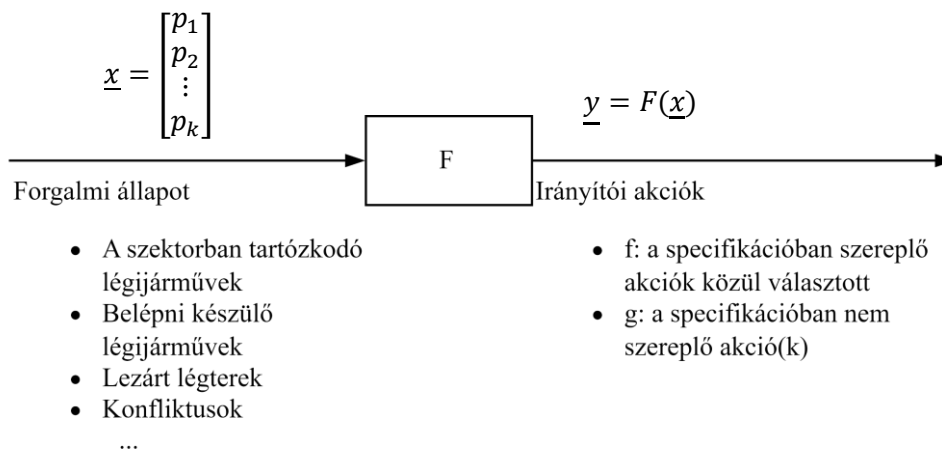
A dokumentum standard időtartamokat is megad az egyes elemekhez:

6. táblázat: A feladatcsoportok standard időtartamai [41]

Feladat	Időtartam
Rutin feladat	43 s
Emelkedés és süllyedés monitorozása	15 s
Keresztező konfliktus monitorozása	70 s
Pálya menti konfliktus monitorozása	10 s
Ellenkező irányú pálya konfliktus monitorozása	10 s

Azonban ez felvet néhány problémát, nevezetesen például a feladatmegoldás munkaterhelésének emberi, egyéni függését. A helyzettudatossághoz való hozzájárulás kifejezése még nehezebb feladat. Egy-egy feladat helyzettudatossághoz való hozzájárulása függhet attól, hogy az irányító a múltban milyen feladatokat végzett már azon a légi járművön, milyen a jelenlegi helyzetképe. Azok a feladatok részesítendőek előnyben, amelyek a helyzetképet bővítik.

3.2.2 A forgalmi állapottól függő feladatok



15. ábra: A forgalmi állapottól függő irányítói akciók

A 15. ábrán az F függvény valósítja meg az aktuális forgalmi állapot hatására a munkaterhelés és a helyzettudatosság optimalizálását az (2) szerint.

$$\underline{y} = F(\underline{x}) \quad (2)$$

Az F bemenete \underline{x} , az aktuális forgalmi állapotot leíró változók vektora, amelyben a forgalmi állapotot $p_{1...k}$ változók írják le. Ennek hatására az F olyan \underline{y} irányítói akciókat állít elő, amelyek

- szükségesek az \underline{x} által leírt forgalmi állapotban,
- kielégítik az optimalizálási feltételeket.

Az F függvényt, mint fekete dobozt tekintve megjegyezhető, hogy akár gépi tanulási algoritmusokkal is implementálható a leképezés, feltéve, hogy a megbízhatósági alkalmazási követelményeknek eleget tesz.

Az optimumot biztosító feltételek a (3) egyenlettel írhatók le.

$$\underline{y} = [\underline{f}, \underline{g}] \forall i \in [1 \dots n], (f_i, g_i): \left\{ \begin{array}{l} \omega_{min} < \omega(f_i) + \omega(g_i) < \omega_{max} \\ L(f_i) + L(g_i) > L_{min} \end{array} \right\} \quad (3)$$

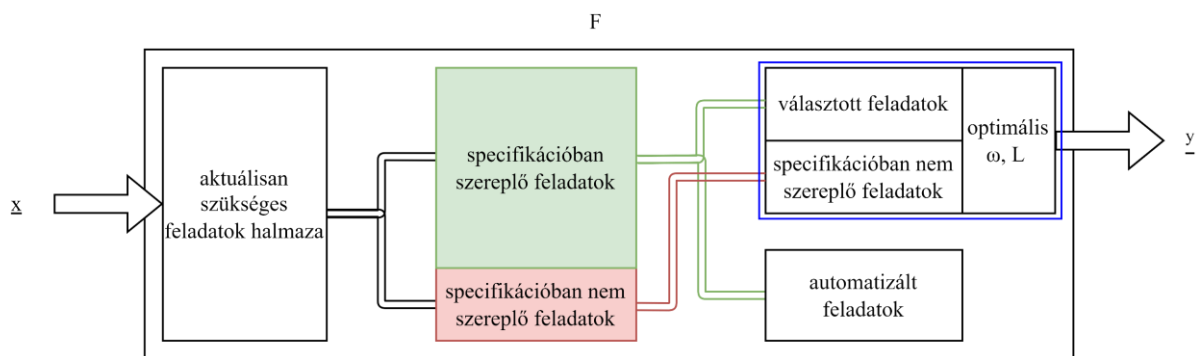
ahol

- \underline{f} a specifikációban szereplő akciók közül választott f_i ($i \in [1 \dots n]$) akciókat tartalmazó vektor,
- \underline{g} a specifikációban nem szereplő g_i ($i \in [1 \dots n]$) akciókat tartalmazó vektor,
- ω_{min} a munkaterhelés minimum küszöbje,
- ω_{max} a munkaterhelés maximum korlátja,
- L_{min} a helyzettudatosság minimum küszöbje.

Az optimális munkaterhelés határai ω_{min} és ω_{max} , ahol a g_i feladatok által generált munkaterhelésen túl a határon belül tartáshoz az aktuálisan szükséges akciók közül választott f_i akciók használhatók szabályzási célra. A helyzettudatosság feltétele abban különbözik a munkaterhelésétől, hogy nem rendelkezik maximum értékkel.

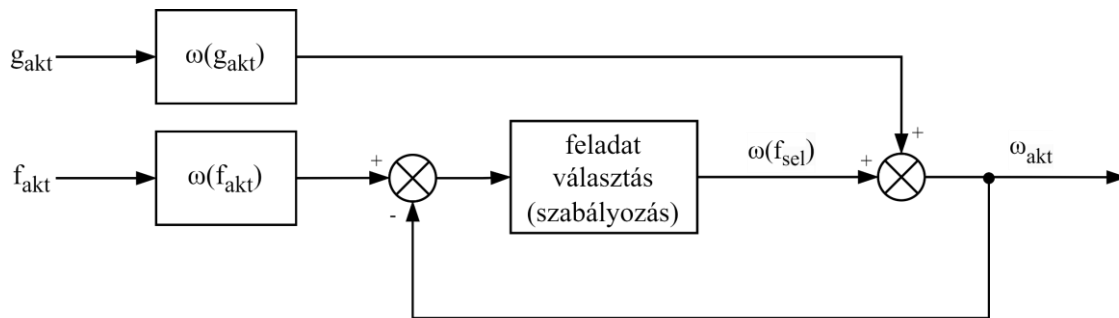
3.2.3 Munkaterhelés szabályzás

Az előző pontban bemutatott F függvény végzi a forgalmi állapot függvényében az optimális munkaterhelés és helyzettudatosság biztosítását. A 15. ábrán látható F kibontása a 16. ábrán látható.



16. ábra: Az F működése

A 16. ábrán a késsel jelölt kimenet az y tartalma. A specifikációban nem szereplő feladatok (ha van ilyen) fix munkaterhelést és helyzettudatosságot jelentenek. Ezt egészíti ki a specifikációban szereplő feladatok azon része, amely választásra, allokálásra kerül. A maradék feladatot az automatika végzi, ami specifikációba eső feladatokból feltételezetten korlát nélkül képes ellátni bármennyit.



17. ábra: Munkaterhelés szabályzó hurok

A 17. ábrán az F munkaterhelés szabályzó köre látható. A szabályozó blokk a szükséges f feladatokból történő választ feladatokat (f_{sel}), amelyek munkaterhelése összeadódik a specifikáción kívül eső feladatokéval, így alkotják az aktuális munkaterhelést. A feladatválasztás alapja ennek a minimum és maximum értékek között tartása.

4. Szimulációs környezet

Szükségessé válik a vázolt automatizálási struktúra tesztelése. Erre a célra kézenfekvő egy tesztkörnyezet létrehozása, amely használható

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

teszteléséhez.

4.1.1 Specifikáció

A tesztkörnyezettel szemben támasztott alapvető követelményeket az alábbi rövid lista összegzi:

1. Adatok

K1.1. Valós adatok

Véletlen generált és/vagy fiktív adatok által leírt forgalom kezelését végző automatika valós körülmények közötti működése nem bizonyítható.

K1.2. Valós idejű adatok

Az archív adatok által leírt forgalom ATC irányítás alatt állt, így a konfliktusok feloldása már megtörtént. Az automatizálás teszteléséhez olyan forgalom szükséges, amely tartalmaz konfliktust.

K1.3. Könnyen hozzáférhető adatok

Zárt, titkosított adatok helyett ingyenesen vagy alacsony költségen beszerezhető adatok alkalmazásával lehetőség nyílik aszéles körű alkalmazásra.

2. Működés

K2.1. Modellezhető az emberi irányító

Érvényességi korlát nélkül, bármely feladat megoldásakor az előre megadott feladatmegoldási időalapok szerinti munkaterhelésének számítása.

A helyzettudatosságra tekintettel modellezhető a feladatok allokációjánál a térbeliség figyelembevétele.

K2.2. Modellezhető a gépi irányítás

Az érvényességi korláton belül eső feladatokhoz az előre definiált időalap szerint számítható terhelése, de ez felső korlát nélkül, bármekkora értéket felvehet.

K2.4. Modellezhető a feladat allokációs logika

Feladatallokálási algoritmus, amely lehetőség szerint megközelíti a humán irányító minimum munkaterhelés szintjét és a maximum elérését megakadályozandó lehetőség szerint a gépre ruház át a gépi érvényességi körbe eső feladatokat.

3. Eredmény

K3.1. A munkaterhelés alakulása

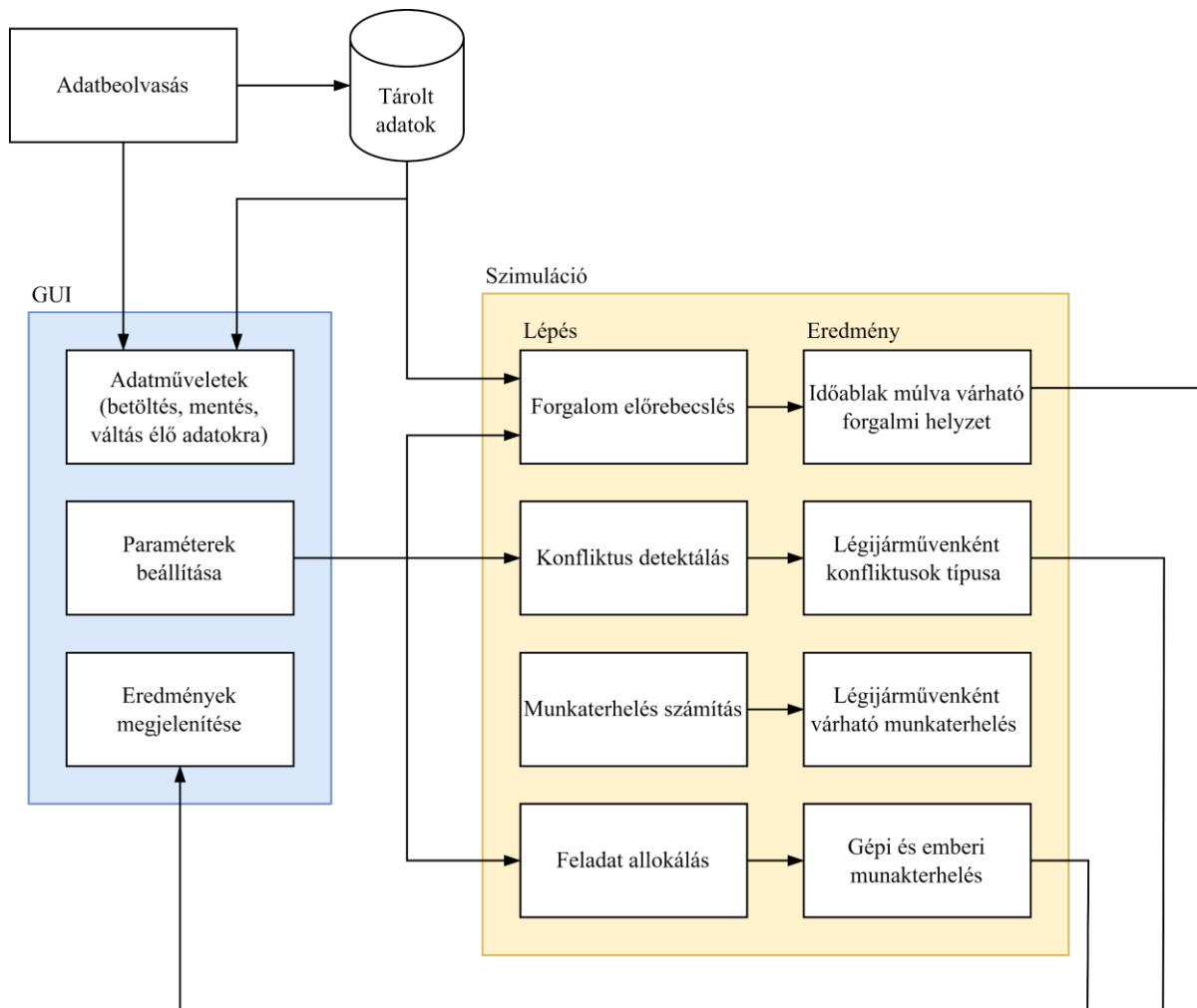
A munkaterhelés alakulása a szimuláció minden időpontjában, a humán munkaterhelés fix (specifikáción kívül eső) és flexibilis (specifikáción belül eső, szabályzási célú) összetevőire különítve, gépi munkaterhelés.

A munkaterhelési korlátok megsértésének naplózása.

K3.3. Feladatok specifikáltsága

A szimuláció során felmerülő feladatok közül a specifikációba esők aránya.

Megjegyzendő, hogy a szimulációhoz valós adatokra van szükség a validációs cél eléréséhez, amely nem lehet archiv, leirányított adat, mivel abban nem lenne irányítási feladat. Így szükségessé válik egyfajta forgalmi igény előállítás. Ez önmagában rövidtávú gyakorlati jelentőséget hordoz, a szektorizáció szervezését nagyban megkönnyíti a repülési terv alapú számítástól független forrású várható forgalmi terheltségi adat. Egy ilyen elven alapuló, nagy pontosságú eszköz fejlesztése további, érdekes kutatási irány tárgyat képez.



18. ábra: A tesztkörnyezet működése

A 18. ábra a tesztkörnyezet működését illusztrálja. Az adatok beolvasását egy külön modul végzi vagy élő adatokra váltani is van lehetőség. A grafikus felhasználói felületen (GUI) néhány fő paraméter beállítására is van lehetőség:

- a forgalmi előrebecslés időablaka,
- a konfliktuskutatás időablaka,
- az emberi munkaterhelés határai,
- feladatok allokálása a térbeliségre tekintettel,
- véletlenszerű, extra forgalom generálása,
- a szimulációs lépések közti késleltetés.

Szöveges kimenetként rendelkezésre áll

- az aktuális adatpont sorszáma a fájl által tartalmazott összes adatból,
- az adatpont időbélyege,
- az összes, emberi és gépi feltételbe eső forgalmi szituáció száma a szimuláció kezdete óta,
- az összes, emberi és gépi feltételbe eső konfliktusok száma a szimuláció kezdete óta,
- a munkaterhelés szélsőértékeinek megsértésének száma a szimuláció kezdete óta.

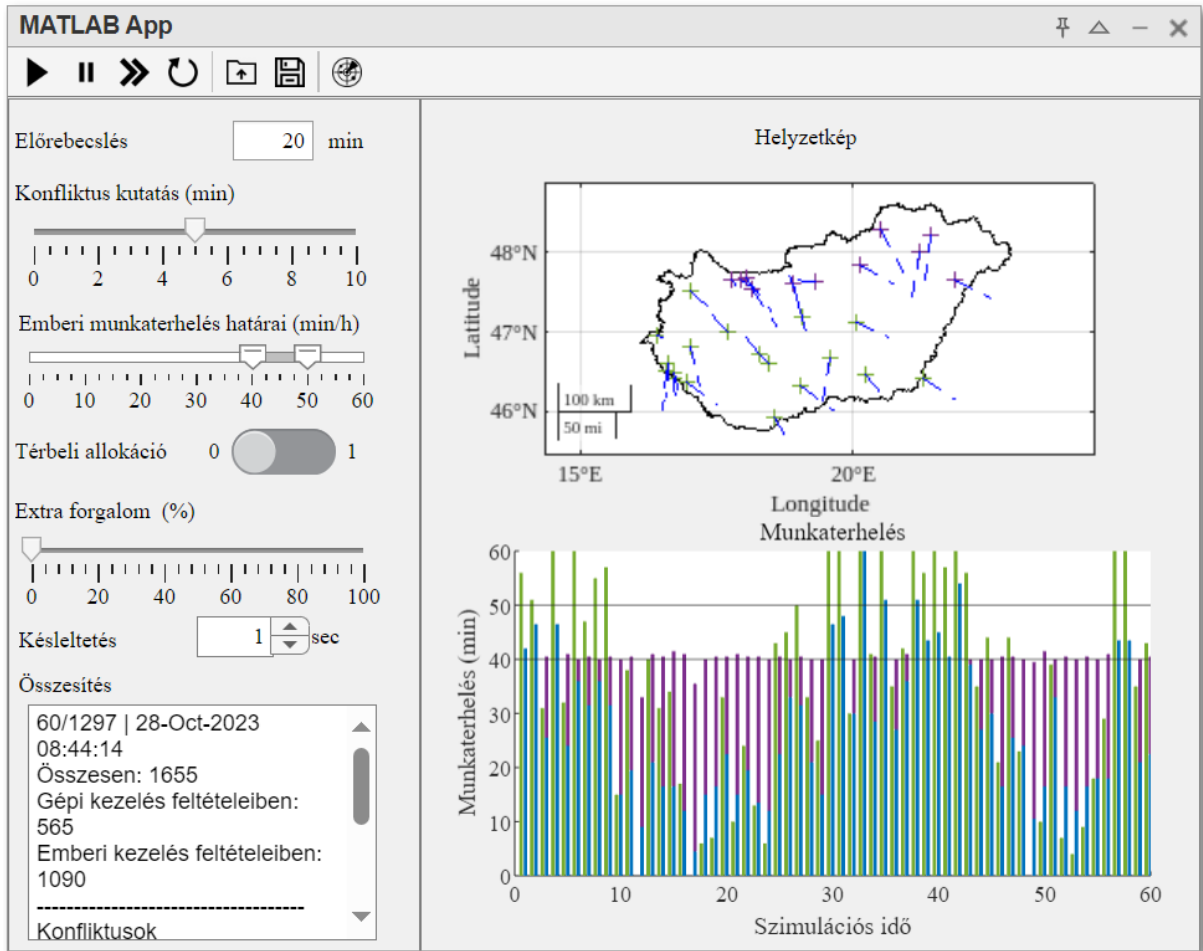
Ezen kívül a tesztkörnyezet két grafikus kimenettel is rendelkezik:

- térképes megjelenítés: az aktuális szimulációs lépésben előálló forgalmi helyzet,
- munkaterhelési diagram: a munkaterhelés megoszlása szimulációs lépésenként.

A grafikus felület következetesen használja a színeket információ átadására:

- zöld: gépi munkaterhelés, olyan légi járművek, amelyekkel csak a gépnek van feladata,
- kék: emberi munkaterhelés fix része (és a légi járművek sebességvektora),
- rózsaszín: emberi munkaterhelés flexibilis része, olyan légi járművek, amelyekkel az embernek bármilyen feladata van.

Az eredmények mentésekor a szimuláció során használt paraméterbeállítások és a kimenetek egyaránt mentésre kerülnek. A tesztkörnyezet MATLAB környezetben készült, grafikus felhasználói felületét a 19. ábra mutatja.



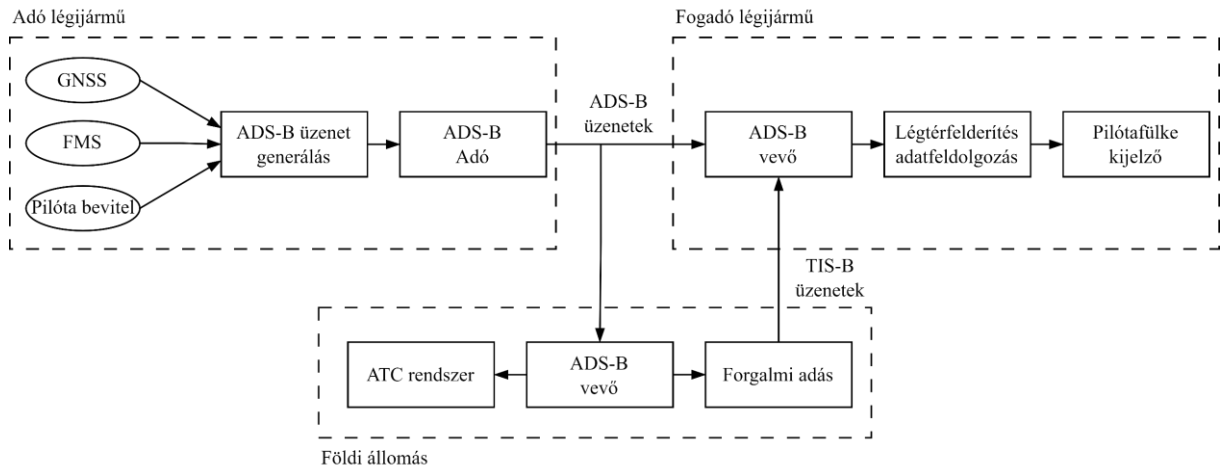
19. ábra: A tesztkörnyezet grafikus felhasználói felülete

4.1.2 Megvalósítás

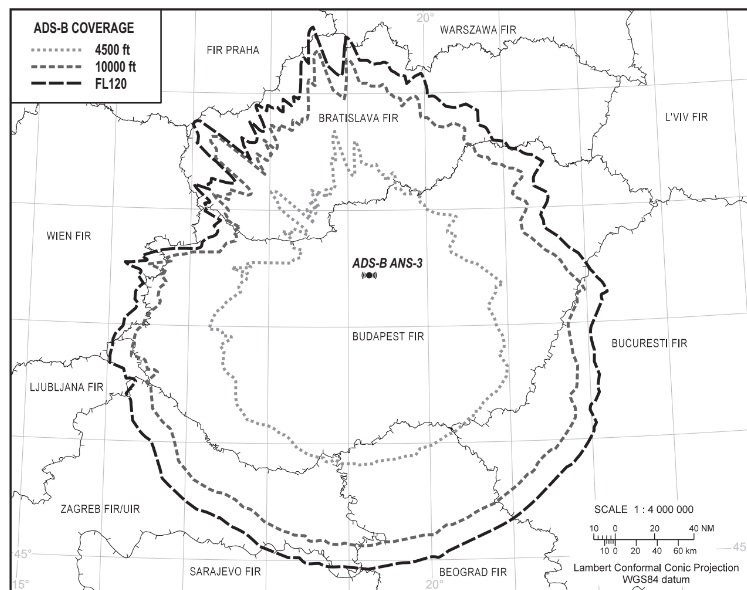
A megvalósítás részletes bemutatása helyett csak néhány, az eredmények szempontjából kulcsfontosságú elem kerül bemutatásra.

Az adatgyűjtés eszköze az ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast). Ez egy redundáns légtér felderítési mód, amely használata bizonyos légitársaságokon 2017 óta kötelező az Európai Unióban [42]. A fedélzeten elhelyezett jeladó a légitársaság néhány kulcsfontosságú paraméterét (pl. hívójel, ICAO 24 bites azonosító, magasság, sebesség, irány stb.) lesugározza, amelyet a földön elhelyezett vevők észlelnek. A rendszer funkcionális blokk diagramja a 20. ábrán látható. Példaképpen a HungaroControl Igló utcai székházán elhelyezett vevő fedésterülete látható a 21. ábrán.

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

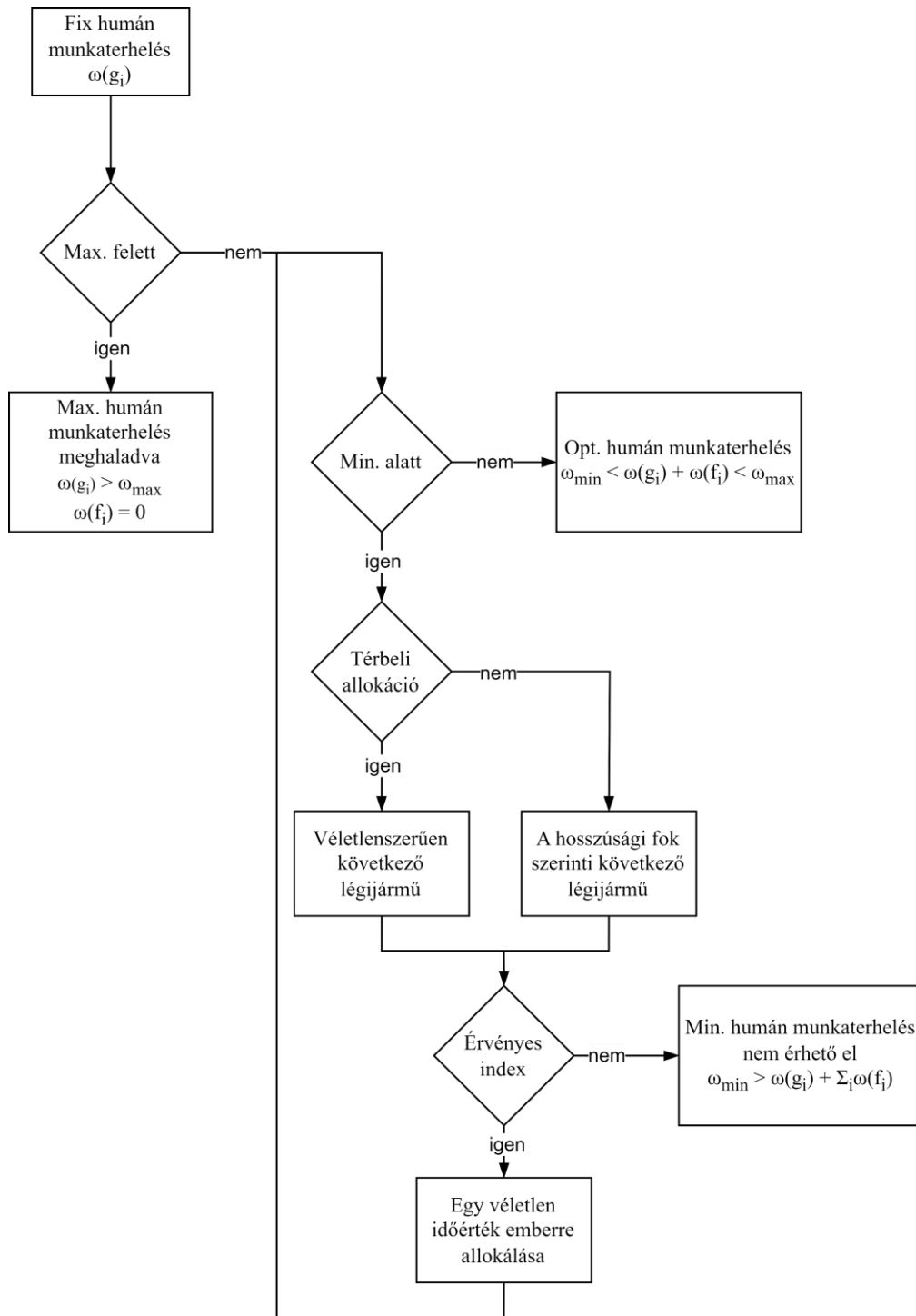


20. ábra: Az ADS-B rendszer komponenseinek blokkdiagramja [43]



21. ábra: A HungaroControl székházán elhelyezett ADS-B vevőkészülék fedési területe [44]

Mivel ilyen könnyen elérhető adatforrásról van szó, így számos tanulmány hasznosította. Például [43] trajektória becslésen alapuló konfliktus detektáló algoritmust készített. [45] az A-CDM (Airport Collaboration Decision Making) rendszerben a trajektóriák klaszterezésével becsülte elő a fékoldási időt. A másik oldalról, a légi jármű teljesítményének becsléséhez is használható, mint ahogy [46] különböző repülőgép típus szerint modelleket állított fel a különböző repülési paraméterek becslésére a repülés egyes szakaszainak megfelelően.



22. ábra: A feladatallokálás algoritmus a szimulációban

A program működésének másik sarkalatos pontja a feladatallokáció. Ez a 22. ábrán vázolt folyamatábrának megfelelően történik. Ez egy kezdetleges, egyszerű algoritmus a munkaterhelés adott határok között tartására. Előnye, hogy a határok dinamikusan változtathatók, implementálása egyszerű és könnyen érthető. A további fejlesztés lehetséges kiindulópontja a helyzetudatosság fenttartását biztosító algoritmus. Jelen esetben ez csak egy egyszerű, véletlenszerűségen alapuló elvet alkalmaz, azonban az egyes feladatok térbeliségének felírása után könnyen bővíthető az algoritmus.

A szimulációban szükség volt egy érvényességi korlát rögzítésére a gépi irányításhoz. Így már az előtt eldönthető, hogy az adott légi járművel kapcsolatos bizonyos (bonyolultabb) feladatok elvégzésére képes lesz-e a gép, hogy az bekövetkezne (pl. konfliktus). Ez jelent például a detektációs idő (amely állítható paraméter) alatt a légi jármű aktuális sebességével megtett körön belül legfeljebb 1 másik légi jármű tartózkodása. Ennek megfelelően egy légi járműhöz az alábbi idők kerültek kijelölésre:

- rutin feladat,
- nincs konfliktus – gépi feladatvégzés,
- nincs konfliktus – emberi feladatvégzés,
- konfliktus – gépi feladatvégzés,
- konfliktus – emberi feladatvégzés,
- határátlépési tevékenység.

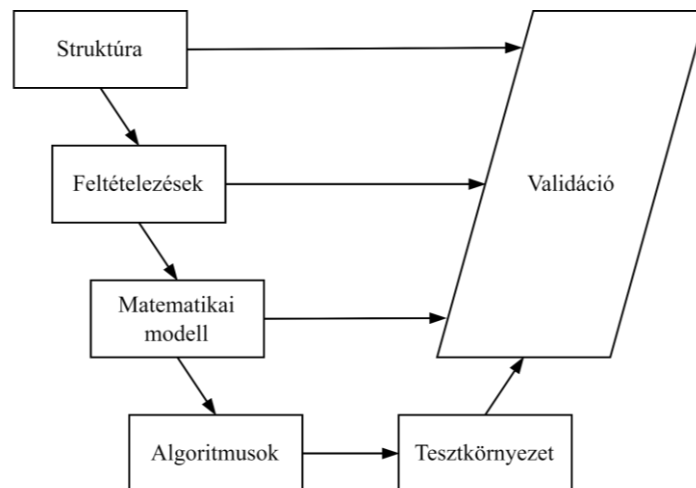
Az idők nagyságának meghatározása az Eurocontrol ajánlása [41] alapján történt.

5. Eredmények értékelése

A fejezet perspektívába helyezi a dolgozatban elért eredményeket egy hosszútávú kutatás részeként.

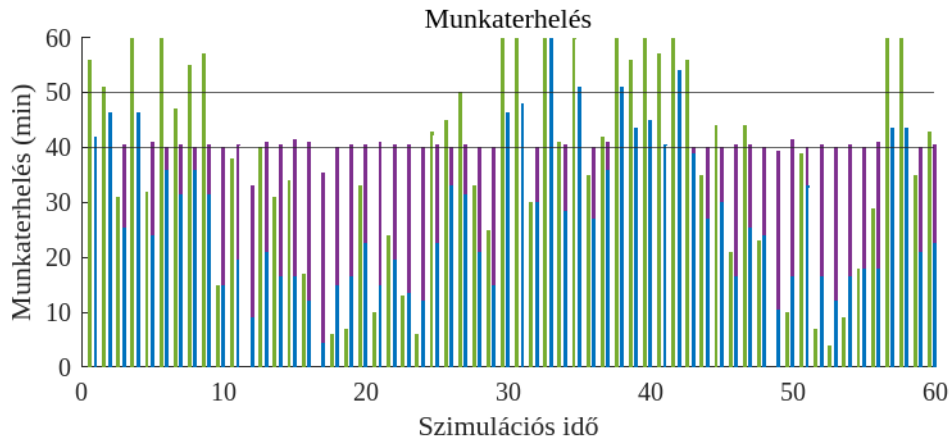
5.1 Elért eredmények

A dolgozatban kidolgozott eredmények menetét a 23. ábra mutatja be. Először a korábbi automatizálási törekvések és a légiforgalmi irányítás automatizálási alapelvei alapján bemutatásra került egy új automatizálási struktúra. Az elv bemutatása után néhány, ahhoz kapcsolódó feltételezés rögzítése történt, mint pl. az interfészek kérdése. Erre épült a matematikai modell, amely formalizált módon írta le a struktúra működését. A tesztkörnyezet fejlesztése és a hozzá kapcsolódó algoritmusok kidolgozása gyakorlatilag egy szinten történt. Itt valós adatokkal is ellenőrizhetővé váltak a korábban még csak feltevés jellegű elemek, pl. a feladat allokációs logika működése. A szimuláció futtatásával végbement a validáció lépése.



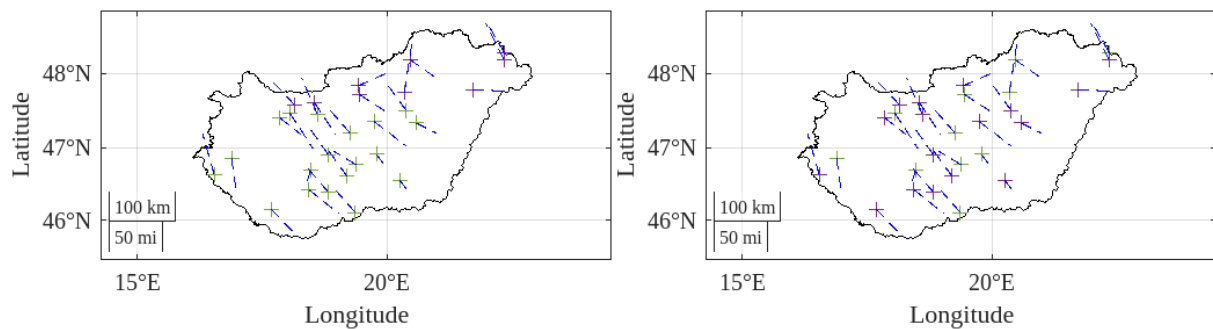
23. ábra: A dolgozat V modellje

A szimuláció eredményei alapján, amelyre egy példát a 24. ábra mutat, a feladat-allokálásnak köszönhetően az emberi irányító munkaterhelése kiegyenlítettebb; a különbség a diagrammon jól látható. Az emberi munkaterhelés automatizálás nélkül a két komponens összegére adódna; azaz az automatizálás kapacitás növelést jelent. Továbbá jól funkcionáló automatizmus mellett a specifikáción kívül eső (kék) emberi feladatok sokszor nem biztosítják a munkaterhelés minimum szintjét. A gépi feladatok átruházásával a kiegyenlítettebb munkaterhelés biztosítható. Ugyanakkor előfordul, hogy az emberi munkaterhelés fix komponense önmagában meghaladja a maximális munkaterhelést, sőt az elméletileg lehetséges munkaterhelést is, így a szektorizáció megtartása szükséges maradhat.



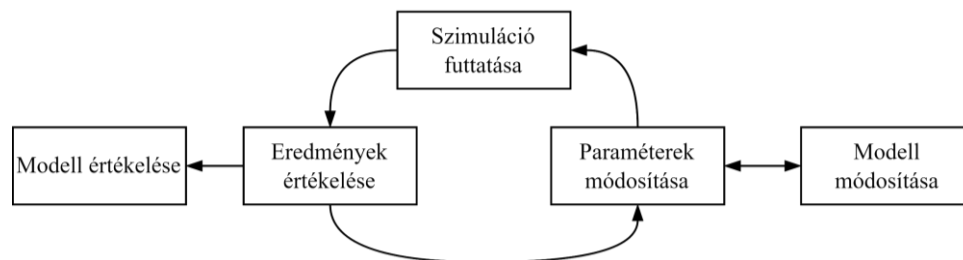
24. ábra: Munkaterhelési diagram

A helyzetudatosság metrikájának kidolgozása további fejlesztési irány részét képezi. Azonban a jelenlegi eredmények alapján az igen egyszerű, véletlenszerű allokálás is szemmel láthatóan jobb térbeli lefedettségre vezet. Ezt mutatja be a 25. ábra, amelyen lila színnel jelenik meg minden olyan légi jármű, amellyel az emberi irányító olyan feladatot végez, amely az automatika érvényességébe tartozik, de rá került allokálásra, zölddel pedig azok, amelyeket az automatizálás kezel.



25. ábra: Feladatok allokálása a térbeliségre tekintettel (jobbra) és anélkül (balra)

A szimuláció futtatása és az ez alapján történő validáció egy körkörös folyamatot alkot, melyet a 26. ábra illusztrál. A folyamat eredménye az eredő feltevés, miszerint lehetséges az irányítás ilyen embergép teammunka architektúrában, alátámasztása vagy cáfolata.



26. ábra: A paraméterek módosítása a szimuláció eredményei alapján

A kezdeti eredmények nyújtanak néhány választ a megvalósíthatósággal kapcsolatos kérdésekre, azonban épp annyi ajtót is megnyitnak az algoritmusok további finomhangolására. A forgalmi előrebecslés, a konfliktus detektálás és a feladatallokálás is igen egyszerű algoritmus szerint történik, amelyek továbbfejlesztése külön-külön is érdekes és releváns kutatási területet mutat.



27. ábra: A dolgozatban felvetett kutatási területek lebontása

A dolgozatban számos olyan kérdés érintése történt, amely önmagában is külön érdekes kutatási terület. A felvetett külön kutatási területeket a 27. ábra foglalja össze. A sárgával jelölt koncepció a kiindulás, amely elkészült. A szürkével jelölt interfészek kidolgozása szükséges, azonban más kutatási terület tárgyát képező elem. A továbbiakban a cél a sötétkék elemek kidolgozása és fejlesztése;

6. Konklúzió

A korábbi ATC automatizálási erőfeszítések és általános automatizálási megfontolások alapján új automatizálási elv került kidolgozásra. Ez hasonlít a meglévő adaptív automatizálási struktúrához, de lényegesen különbözik is attól. A különbség az, hogy a hagyományosan adaptív automatizálásként ismert rendszerekben az emberi irányító felügyeleti funkciót lát el, ahol a feladatokat az emberi gyengeségek kompenzálására osztják ki, amely elsősorban az éberség fenntartását jelenti. Az itt bemutatott struktúrában azonban az emberi irányító biztosítja a biztonság elérését anélkül, hogy a fejlesztő garantálná a specifikáció teljességét. Ezáltal az emberre marad minden olyan feladat, amelyet a gép nem képes elvégezni. Ez azonban várhatóan nem sok feladat lenne, így az irányító munkaterhelése túl alacsonnyá válhat, nem figyeli a forgalmat, a helyzet tudatossága csökkenhet. Ezzel szemben azok a helyzetek, amelyeket a gép nem tud kezelni, várhatóan nagyon összetetté válnak - sőt, idővel egyre összetettebbé válnak, ahogy a korábban nem specifikált szituációkat összegyűjtik és implementálják -, így ilyen esetekben a rendszer biztonsága szempontjából elengedhetetlen, hogy az irányító megfelelő helyzet tudatossággal rendelkezzen. Ezt úgy lehet biztosítani, hogy a rendszer az egyébként a gép által elvégzendő feladatok egy részét az emberre bízta.

A megfogalmazott koncepció matematikai alapjai is kidolgozásra kerültek, valamint a tesztelést lehetővé tevő szimulációs környezet is elkészült. A kidolgozáskor egyre mélyebben a részletek felé haladva láthatóvá vált, hogy számos kérdés igényel külön kutatást, mint például a munkaterhelés vagy a helyzet tudatosság. Így jelen dolgozat egy nagyobb kutatás kezdetét képezheti.

Felhasznált irodalom

- [1] Blom, H., A., P.; Stroeve, S., H.; de Jong, H., H. 2006. Dafety risk assessment by Monte Carlo simulation of complex safety critical operations. National Aerospace Laboratory. *Proceedings 14th Safety-critical Systems Symposium* (pp.47-67).
- [2] *Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága.* MSZ EN IEC 61508-1:2010.
- [3] TÜV SÜD. EN 5012x Functional Safety Standard for the Rail Industry. <https://www.tuvsud.com/en-us/services/functional-safety/en-5012x-railway>. elérés 2023. november 4.
- [4] Road vehicles — Safety of the intended functionality. ISO/PAS 21448:2019(E).
- [5] EASA. 2023. Easy Access Rules for Air Traffic Management/Air Navigation Services (Regulation (EU) 2017/373).
- [6] EUROCONTROL. ESARRs | SKYbrary Aviation Safety. <https://skybrary.aero/articles/esarrshttps://skybrary.aero/articles/esarrs>. Elérés 2023. június 2.
- [7] EASA European Aviation Safety Agency. 2023. „Easy Access Rules for Large Aeroplanes (CS-25) - Revision from January 2023”.
- [8] EUROCAE. Introduction. <https://www.eurocae.net/about-us/>. Elérés 2023. június 3.
- [9] EUROCAE. 2012. ED-109A: Software Integrity Assurance Considerations for Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems.
- [10] EUROCAE. 2009. ED-153: Guidelines for ANS Software Safety Assurance.
- [11] Garot, J., M.; Durand, N. 2005. Failures in the Automation of Air Traffic Control.
- [12] Goldmuntz, L.; Kefaliotis, J., T.; Kleiman L., A.; Rucker, R., A.; Schuchman, L.; Weathers, D. 1981. The AERA Concept. Office of Systems Engineering Management. Department of Transportation. Federal Aviation Administration.
- [13] Mendoza, M. 1999. Current State of ATC Conflict Resolution. Eurocontrol Experimental Centre.
- [14] Planchon, P.; Salembier, P.; Manchon, S.; Pavard, B. 1993. Use of advanced technologies in ATM (air traffic management) domain. *Transactions on Information and Communications Technologies* vol 1.
- [15] Irvine, R. 2005. Distributed Centralisation: A Speculative Approach tot he Coordination of Airborne Conflict-Free Trajectory Re-Planning Using an Array of Sequences. Eurocontrol Experimental Centre.
- [16] Netjasov, F.; Mirkovic, B.; Krstic, S., T.; Babic, O. 2017. „Hazard Identification Approach for Future Highly-automated Air Traffic Management Concepts of Operation: Experiences From The Autopace Project”. Rome, Italy.
- [17] National Research Council, Division of Behavioral and Social Sciences and Education, Board on Human-Systems Integration, és Panel on Human Factors in Air Traffic Control Automation. 1997. *Flight to the Future: Human Factors in Air Traffic Control*. Washington, D.C.: *National Academies Press*.
- [18] National Research Council, Division of Behavioral and Social Sciences and Education, Board on Human-Systems Integration, és Panel on Human Factors in Air Traffic Control Automation. 1998. *The Future of Air Traffic Control: Human Operators and Automation*. Washington, D.C.: *National Academies Press*.

- [19] Sheridan, T., B. 1987. Supervisory Control. *Handbook of Human Factors*. G. Salvendy, ed. New York: Wiley.
- [20] Safety and Airspace Regulation Group. 2016. ATM Automation: Guidance on human-technology integration. Civil Aviation Authority.
- [21] Bainbridge, L. 1983. Ironies of Automation. *Automatica* 19 (6): 775–79.
- [22] Hourizi, R.; Johnson, P. 2001. Beyond Mode Error: Supporting Strategic Knowledge Structures to Enhance Cockpit Safety. University of Bath, Bath BA2 7AY, UK
- [23] Daeunert, S. 2023. Surprised by Automation. Eurocontrol webinar.
- [24] Boring, R., L.; Bye, A. 2008. Bridging human factors and human reliability analysis. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 52nd Annual Meeting.
- [25] Williams, J., C. 1985. HEART – A proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology. *Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (SaRS)*. NEC, Birmingham.
- [26] Rose, A., M. 1989. Acquisition and retention of skills. In *Application of Human Performance Models to System Design*, G. McMillan et al., eds. New York: Plenum Press.
- [27] Parasuraman, R.; Molloy, R.; Singh, I., L. 1993. Performance consequences of automation-induced “complacency.” *The International Journal of Aviation Psychology* 3:1-23.
- [28] Parasuraman, R.; Mouloua, M.; Molloy, R. 1996. Effects of adaptive task allocation on monitoring of automated systems. *Human Factors* 38:665-679.
- [29] Wickens, C., D. 1992. *Engineering Psychology and Human Performance* (2nd ed.). New York: Harper Collins.
- [30] Di Flumeri, G. 2019. Brain–Computer Interface-Based Adaptive Automation to Prevent Out-Of-The-Loop Phenomenon in Air Traffic Controllers Dealing With Highly Automated Systems. *Frontiers in Human Neuroscience* 13(296):296
- [31] van Rooijen, S., J. 2020. Toward Individual-Sensitive Automation for Air Traffic Control Using Convolutional Neural Networks. *Journal of Air Transportation* 28(2):1-9.
- [32] Sheridan, T., B. 2011. Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 41, no. 4 (July 2011): 662–67.
- [33] Parasuraman, R.; Bahri, T.; Deaton, J.; Morrison, J.; Barnes, M. 1990. Theory and Design of Adaptive Automation in Aviation Systems. Technical Report No. CSL-N90-1, Cognitive Science Laboratory. Catholic University of America, Washington, DC.
- [34] O’Hara, J.; Higgins, J. 2020. Adaptive Automation: Current Status and Challenges. Brookhaven National Laboratory
- [35] Sauera, J.; Koa, C., S.; Wastell, D. 2012. A comparison of adaptive and adaptable automation under different levels of environmental stress. *Ergonomics*, 55(8): 840-853.
- [36] Parasuraman, R.; Mouloua, M.; Molloy, R. 1996. Effects of adaptive task allocation on monitoring of automated systems. *Human Factors* 38:665-679.
- [37] Chavaillaz, A.; Wastell, D.; Sauer, J. 2016. System reliability, performance and trust in adaptable automation. *Applied Ergonomics* 52 (2016) 333-342.

- [38] Rieth, M.; Hagemann, V. 2022. Automation as an equal team player for humans? – A view into the field and implications for research and practice. *Applied Ergonomics* Volume 98, January 2022, 103552.
- [39] EASA. 2023. Artificial Intelligence Roadmap
- [40] Embrey, D. 2005. Understanding Human Behaviour and Error. *Human Reliability Associates*, 2005, vol. 1, pp. 1-10.
- [41] Flynn, G.; Benkouar, A.; Christien, R. 2003. Pessimistic Sector Capacity Estimation. EUROCONTROL Experimental Centre.
- [42] European Union: European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) No 1207/2011 of 22 November 2011.
- [43] Baek, K.; Bang, H. 2012. ADS-B based Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Management. *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.* 13(3), 377–385
- [44] HungaroControl. 2023. AIRAC AMDT 002/2023. AIP.
- [45] Shultz, M.; Rosenow, J.; Olive, X. 2020. A-CDM Lite: Situation Awareness and Decision- making for Small Airports based on ADS-B Data. *9th SESAR Innovation Days: Inspiring Long-Term Research in the Field of Air Traffic Management*, SIDs 2019, Dec 2019, Athènes, Greece. fhal-02623883f
- [46] Sun, J.; Ellerbroek, J.; Hoekstra, J. 2017. Modeling aircraft performance parameters with open ADS-B data. *12th Seminar Papers: 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*.
- [47] Schäfer, M.; Strohmeier, M.; Lenders, V.; Martinovic, I.; Wilhelm, M. 2014. Bringing Up OpenSky: A Large-scale ADS-B Sensor Network for Research. *Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 83-94.

Ábrajegyzék

1. ábra: A légi közlekedés összehasonlítása más összetett és/vagy biztonságkritikus iparágakkal a balesetenkénti potenciális halálos áldozatok száma és az interakciók szintje szempontjából [1]	3
2. ábra: Az ATM/ANS részrendszerei [5]	5
3. ábra: Az ATC részrendszerei.....	6
4. ábra: A repülési óránkénti átlagos valószínűség és a hibaállapot hatásainak súlyossága közötti összefüggés [7]	6
5. ábra: Az Autopace projektben vázolt meghibásodási állapotok [16].....	12
6. ábra: Az automatizálás szintjei [19].....	13
7. ábra: Az automatizálás szintjei skálázva [18]	13
8. ábra: Az emberi teljesítmény modellje a hibára adott válasz alapján [18]	15
9. ábra: Zárt hurkú adaptív irányítás [29]	17
10. ábra: A specifikáció teljességének problémája	19
11. ábra Feladatmegosztás a javasolt rendszerben.....	21
12. ábra: Az irányító funkció interfészei.....	22
13. ábra: A feladatok csoportosítása [40]	22
14. ábra: Példa a feladat típusának változására az ATC munkafolyamatban	23
15. ábra: A forgalmi állapottól függő irányítói akciók.....	24
16. ábra: Az F működése.....	25
17. ábra: Munkaterhelés szabályzó hurok	26
18. ábra: A tesztkörnyezet működése	28
19. ábra: A tesztkörnyezet grafikus felhasználói felülete	30
20. ábra: Az ADS-B rendszer komponenseinek blokkdiagramja [43]	31
21. ábra: A HungaroControl székházán elhelyezett ADS-B vevőkészülék fedési területe [44]	31
22. ábra: A feladatallokálás algoritmus a szimulációban	32
23. ábra: A dolgozat V modellje.....	34
24. ábra: Munkaterhelési diagram.....	35
25. ábra: Feladatok allokálása a térbeliségre tekintettel (jobbra) és anélkül (balra).....	35
26. ábra: A paraméterek módosítása a szimuláció eredményei alapján.....	35
27. ábra: A dolgozatban felvetett kutatási területek lebontása.....	36

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A hatások súlyossága és gyakorisága alapján előálló SWAL szintek [10]	8
2. táblázat: Szoftver szabványok kapcsolata [10]	8
3. táblázat: A korábbi automatizálási projektek áttekintése [11].....	9
4. táblázat: Az automatizálás szintjei a Safety and Airspace Regulation Group szerint [20]	14
5. táblázat: A feladatok csoportosítása	23
6. táblázat: A feladatcsoportok standard időtartamai [41]	24