



REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

Kiemelt közlemények

*CSATÓ PÉTER: A Single Fuel Concept
realitásai a fenntarthatóság tükrében*

*BELLER BALÁZS: A repülésbiztonsági
kockázatelemzési eljárások evolúciója II.*

*FÜSTÖS JULIANNA, VAS TÍMEA, KÁROLY KRISZTIÁN:
Légi forgalmi irányítók képzésének és
kiválasztásának perspektivikus lehetőségei
XR-alapokon humánteljesítmény-
diagnosztikai támogatással*

36. évf. (2024)
2. szám

HU ISSN 1789-770X (elektronikus)
HU ISSN 1417-0604 (nyomtatott)



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Repüléstudományi Közlemények

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar tudományos kiadványa

Elektronikus kiadás
HU ISSN 1789-770X

Nyomtatott kiadás
HU ISSN 1417-0604

A szerkesztőbizottság elnöke

Prof. Dr. Óvári Gyula (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

A szerkesztőbizottság tagjai

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dudás Zoltán (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dunai Pál (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavas László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Károly Krisztián (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Major Gábor (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
† Prof. Dr. Makkay Imre (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Palik Mátyás (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Pokorádi László (Óbudai Egyetem)
Dr.h.c. doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD, MBA, LL.M (Kassai Műszaki Egyetem, Szlovákia)
Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (Óbudai Egyetem)
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Vas Tímea (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

Szerkesztőség

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) főszerkesztő
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) szerkesztő
Törőcsik Tímea (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) szerkesztőségi titkár

Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.

Levelezési címe: 5008 Szolnok, Pf. 1.

e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu

Kiadó

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Ludovika Egyetemi Kiadó
1083 Budapest, Ludovika tér 2.
kiadvanyok@uni-nke.hu, +36 1 432 9000
A kiadásért felel: Deli Gergely rektor

Borítókép: dr. Toperczer István



Tartalom

CSATÓ PÉTER: A Single Fuel Concept realitása a fenntarthatóság tükrében	5
BELLER BALÁZS: A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója II.	19
FÜSTÖS JULIANNA, VAS TÍMEA, KÁROLY KRISZTIÁN: Légi forgalmi irányítók képzésének és kiválasztásának perspektivikus lehetőségei XR-alapokon humánteljesítmény-diagnosztikai támogatással	47
TAMÁS SZAKÁCS: Orbital Mechanics Two-Body Model for Educational Purposes	61
GÁBOR TERPECZ, GYÖRGY SCHUSTER: Application of Drones in Electrical Power Engineering	73
MHD BASHAR AL KAZZAZ, ÁRPÁD VERESS: CFD Analysis of the Combustion Process Evolved in the TKT-1 Academic Jet Engine.	87
ZSOLT LUCZ: Courage as a Virtue in the History of Military Pilots	101
LAJOS HALMI: The Emergence of Classical Military Virtues in Air Force Teams and Their Modern Assessment Possibilities.	109
MÉSZÁROS ZOLTÁN: Repülés és repülőeszközök az első magyar katonai szakfolyóiratban 1877 és 1907 között.	117
HORVÁTH GÁBOR: Kibervédelmi kockázatértékelés a légi forgalmi irányításban: az európai metodika.	135
ALBERT CSONGOR, BÉKÉSI BERTOLD, JÁMBOR KRISZTIÁN: A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat, az AFDX.	149

Csató Péter

A Single Fuel Concept realitása a fenntarthatóság tükrében

A NATO Single Fuel Concept (SFC) célja az üzemanyag-ellátási logisztika egyszerűsítése és a szövetséges haderők interoperabilitásának biztosítása a szárazföldi, légi és tengeri platformokon, egy egységes tüzelőanyag – jellemzően JP-8 – alkalmazásával. A klímaváltozás jelentette kihívások és a fenntarthatósági célkitűzések azonban új irányokat jelölnek ki a katonai energiafelhasználás terén. Jelen tanulmány áttekinti az SFC kialakulását, jelenlegi alkalmazási gyakorlatát, valamint vizsgálja, hogyan illeszthetők be a fenntartható repülési tüzelőanyagok a koncepcióba anélkül, hogy sérülne a hatékonyság vagy az interoperabilitás.

Kulcsszavak: egyetlen üzemanyag koncepció, fenntartható repülőgép-üzemanyag, interoperabilitás, klímaváltozás, károsanyag-kibocsátás, NATO-dekarbonizáció

1. Bevezetés

Az energiabiztonság és az interoperabilitás kiemelt jelentőségű tényezők a katonai műveletek tervezésében és végrehajtásában, ezért is alapvető pillérei az Észak-atlanti Szerződés Szervezete (NATO) katonai erejének. 1986-ban a NATO az üzemanyag-logisztika terén is érvényesítette ezeket az elveket a Single Fuel Concept¹ (SFC) bevezetésével, amely azóta is meghatározza a szövetséges haderők üzemanyag-ellátási politikáját. Az SFC lényege, hogy minden hadszíntéren egységes tüzelőanyagot – jellemzően JP-8 (F-34) – alkalmazzanak a szárazföldi, légi és vízi járművek meghajtására egyaránt. Ez jelentősen leegyszerűsíti az ellátási láncokat, és növeli a szövetséges rendszerek közötti együttműködési képességet.

A 21. század második évtizedében azonban új stratégiai és környezeti kihívások jelentek meg: a klímaváltozás elleni fellépés, a fosszilis energiahordozóktól való függőség csökkentése, azaz a fenntartható üzemanyagokra való áttérés igénye. A NATO 2022-es Stratégiai Koncepciója már világosan kijelölte ezt az irányt. A szövetségesek felismerték, hogy a klímaváltozás „korunk meghatározó kihívása”, így hozzá kell járulniuk az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez, javítaniuk kell az energiahatékonyságot és megkezdeni a fenntartható energiaforrásokra való fokozatos átállást a hatékonyság és az elrettentés,

¹ Single Fuel Concept: egyetlen tüzelőanyag koncepció.

valamint a védelmi képesség megőrzése mellett [1]. Ebben az új kontextusban a Single Fuel Concept jövője is kérdésessé válhat, különösen a fenntartható repülőgép-üzemanyagok (SAF²) megjelenésével és terjedésével [2].

2. A NATO Single Fuel Concept történeti áttekintése

Az egységes katonai tüzelőanyag használatának gondolata a II. világháború után merült fel, azzal a céllal, hogy egyszerűsítse a hajtóanyagok logisztikai ellátási láncát. A NATO szárazföldi erői az 1960-as évek közepén tértek át az F-34 típusú kerozin használatára, majd az 1970-es években történt meg a döntő lépés az üzemanyagok egységesítésére, amikor a szövetséges légierők úgy határoztak, hogy az F-40 típusú kerozint a biztonságosabb, kevésbé gyúlékony F-34-re cserélik. Az F-34 kerozin a polgári repülésben használt JET A-1 üzemanyagon alapul, és világszerte elérhető.

A NATO-országok 1988-ban állapodtak meg abban, hogy az egységes üzemanyag koncepcióját hosszú távú célként fogadják el. Ez a koncepció arra az elvre épül, hogy az F-34 típusú kerozin használható legyen a NATO-erők földi járműveiben, berendezéseiben, valamint a földi (nem hajófedélzeti) katonai repülőgépekben is. A koncepció nem terjed ki a haditengerészeti műveletekre, sem a speciális célokra használt, nagy energiasűrűségű üzemanyagokra [4].

Az SFC megvalósításával kapcsolatos technikai megfontolások a NATO-tagországok által használt három különböző üzemanyagtípust érintettek:

- Benzin – NATO F-57: Az Otto-motorok működtetésére szolgál. Rendkívül illékony, gyúlékony üzemanyag, és nem alkalmas dízelmotorokban vagy gázturbinákban való használatra. (Később az F-67 típusú ólommentes benzin váltotta fel.)
- Dízel – NATO F-54: A kompressziós gyújtású motorokban használt kereskedelmi dízelolaj katonai megnevezése. Megfelel az EN 590 európai szabványnak, és egyenértékű az amerikai DF-2 néven ismert dízelolajjal.
- Különböző típusú kerozinok:
 - F-35: Katonai repülőgépek gázturbinás hajtóműveihez használt kerozin, amely egyenértékű a legtöbb polgári gázturbinás repülőgép üzemeltetője által használt üzemanyaggal (JET A-1 vagy AVTUR).
 - F-34: Az F-35 típusú kerozinból, különböző adalékanyagok hozzáadásával létrehozott tüzelőanyag. Azonos a JP-8 vagy AVTUR/FSII típusú üzemanyaggal.
 - F-40: Benzin és kerozin keveréke, amely gázturbinás hajtóművek táplálására szolgál. Már csak néhány nemzet használja, főként kiképzési célokra. JP-4 vagy AVTAG/FSII néven is ismert. A NATO-n belül az F-34/F-35 vészhelyzeti helyettesítője.
 - F-44: Speciális, magas lobbanáspontú üzemanyag, főként repülőgép-hordozókon használt repülőgépekhez. Csak néhány finomítóban állítják elő világszerte, és korlátozottan beszerezhető. JP-5 vagy AVCAT/FSII néven is ismert.

² Sustainable Aviation Fuel: olyan megújuló vagy hulladékból származó repülőgép-üzemanyagok, amelyeknek legalább 10%-os karbonlábnym-csökkenést kell elérniük a fosszilis tüzelőanyagok 89 g CO₂ e/MJ-os értékéhez képest [3].

Az F-35 átalakítása F-34 típusú üzemanyaggá az alábbi adalékanyagok hozzáadásával történik:

- korróziógátló, kenőképeség-javító;
- tüzelőanyag-rendszer jegesedésgátlója (FSII³);
- sztatikus feltöltődést csökkentő adalék (SDA⁴).

Mind a négy fő típusú kerozin használható gázturbinás hajtóművekben, kisebb berendezésmódosítással, de csak az F-44, az F-35 és az F-34 alkalmas dízelmotorokban történő felhasználásra is. Ezeket alacsony dermedéspont és jó termikus stabilitás jellemzi [5].

3. A Single Fuel Concept előnyei és hátrányai

A koncepció elsődleges célja a NATO-erők szárazföldi és légi műveleteiben alkalmazott üzemanyag-logisztika egyszerűsítése annak érdekében, hogy lehetővé váljon az üzemanyag egységes elosztása és felhasználása minden NATO-tagállamban, valamint hogy az üzemanyag fogadása, tárolása, szállítása és elosztása a NATO rendszerén keresztül történjen.

Természetesen továbbra is a legfontosabb szempont maradt, hogy az F-34 vagy az F-35 üzemanyag minősége a légi közlekedésben semmilyen körülmények között ne sérüljön. Emellett az is kiemelendő, hogy a minőség-ellenőrzési eljárásokon sem szabad változtatni egészen az F-34 vagy F-35 földi felhasználási pontig történő eljuttatásáig.

Az SFC elfogadása a NATO-műveletek során technikai, logisztikai, hadműveleti és gazdasági előnyöket is kínál:

- A JET A-1 (F-35) világszerte beszerezhető, és az F-34-re könnyen átalakítható adalékok hozzáadásával.
- Az F-34 és az F-35 dermedéspontja jelentősen alacsonyabb (körülbelül -47 °C), kevésbé hajlamos mikrobiológiai szennyeződésre, és stabilabb tárolási jellemzőkkel bír, mint a dízel, valamint a kenőképesége is jobb.
- Csökkenti az ellátási problémákat, valamint egyszerűbb logisztikai beszerzési láncot és infrastruktúrát tesz lehetővé, ezáltal csökkennek a szállítási és elosztási költségek is.
- Jelentősen növeli a fenntarthatóságot, javítja a felszerelések közötti interoperabilitást, és nagyobb rugalmasságot biztosít a harcrend kialakításában, valamint gyorsabb csapatathelyezést tesz lehetővé.
- Csökken az üzemanyag-szennyezés (interkontamináció) kockázata [6].

A koncepció bevezetése három szakaszban történik:

Az elsőben – amely mára már lezárult – az F-40 üzemanyag kiváltása történt meg F-34-gyel és F-35-tel a NATO európai országaiban állomásozó repülőeszközök esetében.

A második fázisban a dízel (F-54) üzemanyagot váltották ki F-34-gyel vagy F-35-tel szárazföldi járművekben és dízelmotoros vagy gázturbinás repülőeszközökben. Ezt a szakaszt minden tagország önállóan hajtja végre a saját eszközcseraprogramjaival összhangban. A folyamat előrehaladásáról szóló részletes jelentéseket, valamint az eközben szerzett tapasztalatokat két évente teszi közzé az Üzemanyag és Kenőanyag Munkacsoport (F&LWG).

³ Fuel System Icing Inhibitor.

⁴ Static-Dissipator Additive.

Végül a harmadik szakasz a benzin katonai célú használatának megszüntetését célozza, olyan mértékben, hogy az igény annyira alacsonnyá váljon, hogy az nemzeti vagy kétoldalú megállapodások révén is biztosítható legyen [7].

A Single Fuel Concept implementálásának megkönnyítésére több szabványosítási dokumentum készült. Ilyenek a:

- STANAG 3749: Célja a NATO fegyveres erői által használt üzemanyagok minimális minőség-ellenőrzési követelményeinek meghatározása békeidőben, válsághelyzetben és konfliktus során.
- STANAG 4362: Irányelveket ad a jövőbeli haditechnikai eszközök számára használatos üzemanyagokra vonatkozóan, amelyek dízelmotorral vagy gázturbinás hajtóművel működnek.
- STANAG 3747: Útmutatást nyújt a gázturbinás hajtóművek üzemanyagainak minimális minőségi követelményeiről (1. táblázat), mint például az F-24, F-27, F-34, F-35, F-37, F-40, F-44 hajtóanyagok [8].

1. táblázat
Gázturbinás repülőgép-hajtóművek tüzelőanyagai [9]

Tüzelőanyagok megnevezése					
NATO	F-34	F-35	F-40	F-44	F-45
USA	MIL-T-83133 (JP-8)	ASTM JET A-1	ASTM JET B	MIL-T-5624G (JP-5)	MIL-T-5624D (JP-4)
Anglia	D. Eng. R. D. 2453	D. Eng. R. D. 2494	D. Eng. R. D. 2486	D. Eng. R. D. 2498	D. Eng. R. D. 2486
Franciaország	AIR3405	AIR3405	AIR3407	AIR3404	AIR3407
Kanada	3-GP-23	3-GP-23	3-GP-22	3-GP-24	3-GP-23
Oroszország		T-1, TSZ-1	RTt	T-7	
Alapvető jellemzők					
Sűrűség (15,56 °C-on) [g/cm ³]					
közepes	0,806	0,806	0,764	0,816	0,776
maximális	0,825	0,825	0,802	0,845	0,802
Kinetikai viszkozitás (-34,4 °C-on) [cSt]	15	15	3	16	2,5
Fagyáspont [°C]	-50	-54	-60	-56	-60
Égéshő [kJ/kg]	42 738	42 738	42 738	42 612	42 738

Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy az új üzemanyag alkalmazásának hatására egyes járművekben teljesítménycsökkenés tapasztalható. Bizonyos esetekben pedig módosítások szükségesek a járműveken vagy a berendezéseken, illetve további adalékok használatára van szükség. Noha az egyféle üzemanyag alkalmazása számos logisztikai előnnyel jár, a dízelolaj kerozinnal való helyettesítése több kompatibilitási problémába ütközött. Ezek közül az egyik az 1990–1991-es Desert Shield és Desert Storm hadműveletek során észlelt, alacsony kenőképességű üzemanyag miatti meghibásodások az adagolóban [10].

A kerozin viszkozitása alacsonyabb, mint a dízel üzemanyagé, és tovább csökken, ahogy nő a hőmérséklet. Alacsony viszkozitás esetén nem biztosít megfelelő kenést, így jelentősen nő a kopás lehetősége, mivel a csúszó alkatrészek felületei érintkezhetnek egymással. Ez belső szivárgást eredményezhet, ami csökkenti az égéstérbe juttatott üzemanyag mennyiségét, és meghibásodáshoz vezet.

Másik probléma, hogy noha a dízel üzemanyagnak kisebb a fajlagos égéshője, mint a JP-8-nak, magasabb sűrűsége miatt térfogategységre vetítve nagyobb égéshővel rendelkezik. Ezért a kerozin kisebb energiabevitelt eredményez a motorba, ami jellemzően alacsonyabb hengernyomást és kisebb teljesítményt jelent.

A JP-8 nagyobb összenyomhatósága miatt lassabb a nyomás felépülése az üzemanyag-szivattyúban. Emellett alacsony cetánszáma gyulladási késedelmet okoz, így több üzemanyag kerül a hengerbe, mielőtt meggyullad, ami durvább égést eredményez. Hidegindítás esetén a motor nehezen vagy egyáltalán nem indul be [4].

A régebbi dízelüzemű motorok teljes optimalizálása lehetséges, azonban sok esetben igen költséges lenne. A szabványos dízel és a kereskedelmi repülőgép-üzemanyag jellemzően könnyebben beszerezhető, valamint előállítás és adalékolása is olcsóbb, mint a JP-8-é különösen nagy mennyiségben, így a nem kimondottan katonai célokra használt járműveknél (például logisztika, kiképzés, bázison belüli mozgás) felesleges költségnövekedést jelentene az átállítás.

Ezért az egyes országok fenntarthatják saját ellátási láncukat, nemzeti szabványukat anélkül, hogy sérülne az interoperabilitás, és csak műveleti környezetben, illetve többnemzeti gyakorlatokon térnek át teljesen a JP-8 használatára.

4. Új kihívások

A klímaváltozás napjaink egyik legégetőbb problémája, amelynek hatásai mára már elvitathatatlanok. A bolygó újra és újra figyelmeztet, hogy a felmelegedés elérte a kritikus pontot. Már nincs meg az a luxusunk, hogy késlekedjünk e kihívás kezelésében. Az ipari és kereskedelmi szektornak együtt kell működni, hogy drasztikusan csökkenthessük az üvegházhatású gázok kibocsátását. Ez alól nem kivétel a hosszú ideig figyelmen kívül hagyott globális védelmi ipar sem, amely hatalmas mennyiségű fosszilis tüzelőanyagot használ fel (1. ábra). A világ hadseregeinek pontos hozzájárulását a globális emisszióhoz rendkívül nehéz kiszámítani, mivel eddig kevés adatot rögzítettek és tettek között.



1. ábra

A USS Ronald Reagan vezette kötelék 2018-ban a Valiant Shield hadműveletben [11]

Ennek ellenére becslések szerint a világ fegyveres erőinek és az ezeket kiszolgáló iparágaknak a teljes szén-dioxid-termelése akár a globális érték 5%-át is elérheti. Ez a mérték nagyjából megfelel a polgári légi közlekedés és hajózás együttes kibocsátásának [12].

2015-ben az IPCC⁵ megállapodott abban, hogy a globális átlaghőmérséklet-emelkedést az iparosodás előtti szinthez képest legfeljebb 1,5 °C-ra kell korlátozni. Ahhoz, hogy ezt a célt esélyünk legyen elérni, az üvegházhatású gázok globális kibocsátásának a század közepéig nettó nullára kellene csökkennie [13].

Habár a NATO kulcsszerepet tölt be a globális béke és biztonság fenntartásában, a 21. század második évtizedében rá kellett eszmélnie, hogy katonai tevékenységéből származó károsanyag-kibocsátásának csökkentése már nem opció, hanem a fennmaradáshoz szükséges alapvető feladat. Ahogy Jens Stoltenberg, a NATO főtitkára figyelmeztetett a 2021-es glasgow-i ENSZ-klimacsúcson (COP26): „Lehetetlen elérni a nettó nulla emissziót anélkül, hogy a katonai kibocsátásokat is belevonnánk.” [14]

A közelmúlt geopolitikai feszültségei, mint például az orosz–ukrán háború következtében fellépő üzemanyaghiány, ezáltal a fogyatkozó kőolajforrásoktól való függőség még sürgetőbbé teszi a probléma kezelését.

A NATO 2022-es Stratégiai Koncepciójába már beemelték az éghajlatváltozást mint korunk meghatározó kihívását, amely jelentős hatással van a szövetségesek biztonságára. A Koncepció meghatározza a Szövetség előtt álló legfontosabb kihívásokat a következő tíz évre. Ennek eredményeként a klímavédelmi szempontok minden eddiginél hangsúlyosabbak lettek. A NATO célkitűzése, hogy 2030-ig 45%-kal csökkentse a károsanyag-kibocsátását, és 2050-re karbonsemlegessé váljon. (Habár ez a cél csak a NATO létesítményeire és eszközeire vonatkozik, és nem a tagállami hadseregekre, amelyek jóval nagyobb karbonlábnnyommal rendelkeznek [1].) Mindezek megvalósítása érdekében ki kell alakítani a NATO jövőbeli (kőolaj utáni) energiamixének felépítését.

5. Kilátások

A fosszilis tüzelőanyagoktól eltérő energiaforrásokra való átállás a közeljövőben egyszerre kínál lehetőségeket és jelent kihívásokat a NATO katonai üzemanyag-ellátása számára.

Egyrészt az új üzemanyag típusok, mint a fenntartható repülőgép-üzemanyag (SAF), a hidrogén és az elektromos meghajtás, csökkenthetnék a függést olyan külső beszállítóktól, amelyek ellenségesek vagy indifferensek a NATO-val szemben. Azonban ez nagymértékben megbolygatná az ellátási láncot, ami pedig ellentétes az SFC alapvető céljaival.

Másrészt a katonai eszközök hosszú fejlesztési folyamatai és élettartama miatt a védelmi szféra jellemzően késéssel követi a polgári szektor új energiaforrásainak alkalmazását. Ez azt jelenti, hogy a következő 10–15 évben az új típusú katonai üzemanyagok csak marginális szerepet fognak játszani. Ez pedig egyre nagyobb kihívást jelent majd, hiszen a fosszilis tüzelőanyagokhoz kapcsolódó infrastruktúra fokozatosan visszaszorul a polgári szektorban, így a katonai logisztika fenntartása költségesebbé és nehezebbé válik. Ráadásul az európai és észak-amerikai szövetségesek között jelenleg eltérő elképzelések mutatkoznak a jövőbeni hajtóanyagok alkalmazását illetően.

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület.

Az Egyesült Államok hadserege 2035-re hibrid meghajtású harcászati járműveket kíván hadrendbe állítani, míg teljesen elektromos járműveket 2050-re terveznek (2. ábra) [15]. Az Európai Bizottság ellenben abban reménykedik, hogy a hidrogéntechnológia teszi lehetővé a közlekedési szektor szén-dioxid-mentesítését [16].



2. ábra

Az Egyesült Államok hadseregének hidrogénhajtású kamionja [17]

Hasonló különbségek mutatkoznak a légi közlekedési szektorban is. Európában az Airbus hidrogénhajtású üzemanyagcellás hajtóművet fejleszt, amit az egyik lehetséges megoldásként vizsgál a 2035-re tervezett, zero kibocsátású repülőgépekhez (3. ábra) [18].



3. ábra

Az Airbus ZEROe hidrogénhajtású repülőgépének koncepciója [18]

Az Egyesült Államokban a Boeing a hidrogén- és elektromos meghajtással való kísérletezéssel (4. ábra) párhuzamosan a fenntartható repülőgép-üzemanyagokra történő fokozatos átálláson is dolgozik [19].



4. ábra

A Boeing és a JetBlue Airways által támogatott Zunum Aero hidrogénhajtású repülőgép koncepciója [20]

Azonban amíg a hidrogén- és elektromos meghajtás technológiája el nem éri a megfelelő fejlettségi szintet – ami a 21. század második harmadára becsülhető –, más alternatívák kifejlesztésére van szükség. A SAF térnyerése – kereskedelmi és katonai használatban egyaránt – várhatóan középtávon (10–15 év) lesz meghatározó az európai üzemanyag-ellátásban, hiszen *drop-in* jellegük révén közvetlenül helyettesíthetik a JP-8-at, és biomasszából, növényi olajokból, állati zsírokból vagy zöldhidrogénből készülnek kőolaj helyett, valamint a meglévő repülőgépüzemanyag-tárolókban is elhelyezhetők, némi átalakítással. Ez a könnyű integrálhatóság enyhíti az új technológia hosszú bevezetési idejéből fakadó problémákat, hiszen nem igényelnek új platformokat. A norvég, a svéd és a brit légierő például már sikeresen tesztelte a SAF-ot az F-35, F-18 és JAS 39 Gripen vadászrepülőgépeken (5. ábra) [21].



5. ábra

Bioüzemanyaggal hajtott JAS 39 Gripen [22]

Sajnos a jelenleg rendelkezésre álló alternatívák nagy része az érvényes nemzetközi szabványok alapján (ASTM D1655 és D5766), a 2. táblázatban láthatóan maximum fele-fele arányban keverve használható hagyományos kerozinnal, így amennyiben nem történik további fejlesztés, ezek csupán átmeneti megoldást jelentenek.

2. táblázat
A SAF-ek előállítási módjai és keverési arányuk [23]

Üzemanyag típusa	Nyersanyag	Keverési arány
Fischer–Tropsch szintetikus paraffin kerozin (FT-SPK)	Biomassa (erdészeti maradványok, szilárd városi és mezőgazdasági hulladék)	Legfeljebb 50%
Hidrogénezett észterek és zsírsavak (HEFA)	Olajtartalmú biomassa (jatropa, camelina, algák)	Legfeljebb 50%
Hidrogénezett erjesztett cukrokból szintetizált izoparaffinok (HFS-SIP)	Cukor átalakítása szénhidrogénné mikrobiális módszerrel	Legfeljebb 10%
FT-SPK aromás vegyületekkel (FT-SPK/A)	Megújuló biomassa (erdészeti maradványok, energianövények, mezőgazdasági és városi szilárd hulladék)	Legfeljebb 50%
Alkoholból előállított szintetikus paraffin kerozin (ATJ-SPK)	Mezőgazdasági hulladékok, melléktermékek (erdészeti fahulladék, szalma, fű)	Legfeljebb 30%
Alacsony dermedéspontú hidrogénezett észterek és zsírsavak (HFP-HEFA)	Olajtartalmú biomassa (jatropa, camelina, algák)	Legfeljebb 50%

Ugyanakkor a SAF termelésének továbbra is nagyon alacsony az aránya a teljes kereslethez képest: a világon a repülőgép-üzemanyag előállításának kevesebb mint 2%-át teszi ki. Látható, hogy rövid távon nincs reális esély arra, hogy a nagyobb katonai járművek – mint a harckocsik, a vadászrepülőgépek és a páncélozott csapatszállítók – fosszilis tüzelőanyagok nélküli hajtással működjenek [21].

Mivel a védelmi szféra az üzemanyagokat civil kereskedelmi csatornákon keresztül szerzi be, a polgári kínálat és infrastruktúra visszaesése súlyosbíthatja az ellátási problémákat. Így elképzelhető, hogy a következő évtizedekben „duplikált” tüzelőanyag-infrastruktúrát kell fenntartani a katonai logisztika biztosítására, amelyben helyet kap a megőrzött fosszilis üzemanyag-ellátás és az új típusú alternatív infrastruktúra is. Ezzel pedig ismét csak az SFC elveivel ellentétes hatást érünk el.

A NATO-szövetségesek fegyveres erőinek dekarbonizálása a jövőben drasztikusan bonyolíthatja az energiaellátás logisztikáját. Ugyanakkor a fokozódó társadalmi nyomással szembenező államok akár elhamarkodottan is választhatják az azonos célt szolgáló, de egymással versengő technológiák beemelését, ami veszélyeztetheti a NATO-haderők interoperabilitását, és ezáltal gyengítheti elrettentő és védelmi képességét. Ezért rendkívül fontos, hogy a Szövetség tagjai közös jövőképet fogalmazzanak meg a leendő üzemanyag- és energiarendszerek kialakításáról, valamint még nagyobb hangsúlyt helyezzenek az interoperabilitási szabványok fejlesztésére. Ezzel garantálhatják azt is, hogy a haderők dekarbonizációja ne veszélyeztesse a NATO kollektív védelmi képességeit [2].

Az átmenet folyamata megindult: a 2023-as vilniusi NATO-csúcstalálkozón a tagállamok megállapodtak egy kezdeményezés, a *Military Energy Transition by Design* végrehajtási tervének kidolgozásában, célul tűzték ki a katonai energiafelhasználás átalakítását, beleértve az alternatív üzemanyagok integrálását a NATO logisztikai rendszerébe. Azonban egyelőre a tagállamok közötti eltérő megközelítések és a növekvő katonai kibocsátások kihívást jelentenek a felállított célok elérésében, ami az üvegházhatású gázok kibocsátásának legalább 45%-os csökkentését jelentené 2030-ig, valamint nettó zéró kibocsátást 2050-re [24].

Látható, hogy a Single Fuel Concept jelenlegi állapotában elavult politikává vált, és hosszú távon már nem tartható elveket is tartalmaz. Azonban az alapvető elgondolások, mint az üzemanyag-ellátó logisztika egyszerűsítése és a tagországok haditechnikai eszközeinek rendszerszintű együttműködése a mai napig fontos, releváns célok. Emellett viszont nem szabad elfeledkezni a kor előrehaladtával megjelenő újabb és újabb kihívások figyelembevételéről sem.

Hosszú távon az SFC rugalmasabbá tétele, modernizálása – például lehetőséget adva a tagállamoknak alternatív üzemanyag típusok alkalmazására – kulcsszerepet játszhat az energetikai átmenetben. Az egyes tagállamok különböző ütemben távolodnak el a szénalapú üzemanyagoktól, és az ukrajnai háborúból fakadó hatások ezt a folyamatot csak tovább gyorsítják [25]. Ahogy a tagállamok diverzifikálják az üzemanyag típusokat és a beszerzési forrásokat, egyre nehezebbé és kevésbé relevánssá válhat az egységes fosszilis üzemanyag-politika fenntartása. A NATO ehelyett ösztönözhetné a kutatás-fejlesztést a fenntartható repülőgép-üzemanyagok területén. Végül pedig sor kerülhetne a „Single SAF Concept”, az SFC korszerűsített változatának kidolgozására.

6. Összegzés

A JP-8 típusú üzemanyag világszintű, egységes minőségi szabvány szerinti előállítás, könnyű, gyors elérhetősége tette lehetővé az SFC alkalmazását. Az egyféle üzemanyag használata számos technikai, műveleti, gazdasági és környezetvédelmi előnyt biztosít, de a leglényegesebb ezek közül a NATO üzemanyag-ellátási láncának leegyszerűsítése. Ennek ellenére, hogy életre hívása óta számos problémába ütközött, bizonyos mértékig elérte célját, hiszen a műveleti területen, többnemzeti gyakorlatokon napjainkban is a JP-8 az általánosan alkalmazott tüzelőanyag. Éppen ezért a NATO továbbra is fenntartja a koncepciót, hiszen ilyen esetekben a logisztika egyszerűsége, a hibalehetőségek minimalizálása és a magas fokú interoperabilitás létfontosságú. Békeidőben, saját területen végzett feladatok végrehajtása során azonban a nemzetek jellemzően visszatérnek a hagyományos üzemanyagok használatához, mert azok olcsóbbak és jobban elérhetők a civil infrastruktúrából.

A jövőben a fenntartható alternatív tüzelőanyagok felé való elmozdulás várható. A cél, hogy ezek kompatibilisek legyenek a JP-8 szabványokkal, így az új üzemanyagok beilleszthetők legyenek a meglévő SFC-rendszerbe is. Ezeket a szempontokat már a járművek és a hajtóművek fejlesztésekor figyelembe kell venni.

A termelés méretezhetőségével, a költséghatékonysággal, valamint az ellátási lánc ellenálló képességével kapcsolatos kihívások kezelése kulcsfontosságú lesz a további fejlődés szempontjából. Ugyanakkor kétségtelen, hogy megfelelő kutatás-fejlesztés mellett a SAF hosszú távú megoldást jelenthet, és e technológia katonai alkalmazásának fokozatos elterjedése hozzájárulhat egy hatékonyabb, fenntarthatóbb és ellenállóbb védelmi infrastruktúra kialakításához a jövőben.

Azonban a NATO-nak átfogó energiaalkalmazkodási tervre van szüksége annak érdekében, hogy továbbra is képes legyen feladatait betölteni. Ezért a tagállamoknak sürgősen lépéseket kell tenniük a szövetség jövőbeni energiaszükségletének kialakítása, ezáltal annak biztosítása érdekében, hogy a NATO elrettentő és védelmi képességei fennmaradjanak [2].

Felhasznált irodalom

- [1] NATO 2022 Strategic Concept, Madrid, 2022. Online: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2022/6/pdf/290622-strategic-concept.pdf
- [2] D. P. Jankowski, J. Wierzchowicz, „Energy Transition: How NATO Can Get It Right,” Britain's World, Council on Geostrategy, 2023. Online: <https://www.geostrategy.org.uk/britains-world/energy-transition-how-nato-can-get-it-right/>
- [3] J. Pechstein, A. Zschocke, „Blending of Synthetic Kerosene and Conventional Kerosene,” in *Biokerosene: Status and Prospects*, M. Kaltschmitt, U. Neuling szerk. Berlin, Springer, 2018, pp. 665–686. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_25
- [4] G. Fernandes et al., „Impact of Military JP-8 Fuel on Heavy-Duty Diesel Engine Performance and Emissions,” *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 221. évf. 8. sz. pp. 957–970. 2007. Online: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO211>
- [5] NATO Logistics Handbook, NATO Headquarters, Brüsszel, 2012.
- [6] R. Spudić, S. Krešimir, V. Kovačević, „Single Fuel Concept for Croatian Army Ground Vehicles,” *Promet-Traffic & Transportation*, 20. évf. 3. sz. pp. 181–187. 2008. Online: <https://doi.org/10.7307/pt.v21i3.1000>
- [7] F. Work, „Development of Multi-Fuel, Power Dense Engines for Maritime Combat Craft,” *Journal of Marine Engineering & Technology*, 10. évf. 2. sz. pp. 37–46. 2011. Online: <https://doi.org/10.1080/20464177.2011.11020246>
- [8] MIL-STD-3004-1: 2020 Quality Assurance for Bulk Fuels, Lubricants and Related Products, U.S. Department of Defense Standard Practice.
- [9] Óvári Gy., Szegedi P., „Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben,” *Repüléstudományi Közlemények*, 22. évf. 2. sz. pp. 1–12. 2010. Online: http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2010_cikkek/Ovari_Gyula-Szegedi_Peter.pdf
- [10] M. E. Le Pera, „The Reality of the Single-Fuel Concept,” *Army Logistician*, 37. évf. 2. sz. pp. 40–44. 2005.
- [11] Online: <https://www.af.mil/News/Photos/igphoto/2002044407/mediaid/2950584/>
- [12] D. Depledge, „Low-Carbon Warfare: Climate Change, Net Zero and Military Operations,” *International Affairs*, 99. évf. 2. sz. pp. 667–685. 2023. Online: <https://doi.org/10.1093/ia/iia001>
- [13] V. Masson-Delmotte et al., *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global GHG Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Cambridge, Cambridge University Press, 2018. Online: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- [14] M. John, „NATO Chief: Armies Must Keep Pace With Global Climate Efforts,” *Reuters*, 2021. november 2. Online: <https://www.reuters.com/business/environment/nato-chief-armies-must-keep-pace-with-global-climate-efforts-2021-11-02/>
- [15] C. Cranston, *Driving Innovation: Propelling the US Department of Defense's Acquisition of Hybrid-Electric Tactical Vehicles to Win the Wars of Tomorrow*. Charlottesville, Virginia, Judge Advocate General's Legal Center and School, 2024. Online: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4872900>

- [16] Y. Zabanova, „The EU in the Global Hydrogen Race: Bringing Together Climate Action, Energy Security, and Industrial Policy,” in *The Geopolitics of Hydrogen*, R. Quitzow, Y. Zabanova szerk. Cham, Springer, 2024, pp. 15–47. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-031-59515-8_2
- [17] M. A. Vaughan, „H2rescue mission,” *U.S. Army*, 2024. április 18. Online: https://www.army.mil/article/275433/h2rescue_mission
- [18] Airbus S.A.S., „Airbus Showcases Hydrogen Aircraft Technologies During Its 2025 Airbus Summit,” 2025. Online: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-airbus-showcases-hydrogen-aircraft-technologies-during-its-2025>
- [19] A. Jankovsky, C. Andrews, B. Rogers, „Fly the Hybrid Skies: NASA, GE Aerospace, and Boeing are Collaborating on a Hybrid-Electric Airliner,” *IEEE Spectrum*, 61. évf. 2. sz. pp. 28–34. 2024. Online: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2024.10418951>
- [20] J. Benett, „Boeing-Backed Electric Plane Could Fly in 2020s,” *Popular Mechanics*, 2017. október 6. Online: <https://www.popularmechanics.com/flight/news/a28540/boeing-backed-electric-plane-fly-2020s/>
- [21] R. Stoop, I. Patrahau, C. Cassidy, „Securing European Military Fuels in a Tense Security Environment Supply, Distribution and Storage,” The Hague Centre for Strategic Studies, 2025. Online: <https://hcss.nl/report/securing-european-military-fuels-in-a-tense-security-environment-supply-distribution-and-storage/>
- [22] „Gripen Completes Test Flights With 100% Biofuel,” *Saab*, 2017. április 4. Online: <https://www.saab.com/newsroom/stories/2017/april/gripen-completes-test-flights-with-100-biofuel>
- [23] Fehér K., „A katonai léggépjárművek üzemeltetési hatékonyságának, gazdaságosságának javítási lehetőségei az üzembentartás eszközeinek, eljárásainak korszerűsítésével, valamint alternatív energiaforrások alkalmazásával,” Disszertáció, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, 2024. Online: <https://doi.org/10.17625/NKE.2024.041>
- [24] K. Kertysova, „Towards a Greener Alliance: NATO’s Energy Efficiency and Mitigation Efforts,” in *Climate Change, Conflict and (In)Security: Hot War*, T. Clack, Z. Meral, L. Selisny szerk. London, Routledge, 2023, pp. 171–189. Online: <https://doi.org/10.4324/9781003377641>
- [25] A. Farhan, S. Kossmann, A. van Rij, „Preparing NATO for Climate-Related Security Challenges,” London, Royal Institute of International Affairs, 2023. Online: <https://doi.org/10.55317/9781784135799>

Realities of the Single Fuel Concept in Terms of Sustainability

The NATO Single Fuel Concept (SFC) aims to simplify fuel logistics and ensure interoperability among allied armed forces by using a single type of fuel – typically JP-8 – across land, air, and maritime platforms. But the challenges of climate change and sustainability objectives are setting new directions for military energy use. This paper reviews the development of SFC, its current application practices and examines how sustainable aviation fuels can be integrated into the concept without compromising efficiency or interoperability.

Keywords: *single fuel concept, sustainable aviation fuel, interoperability, climate change, harmful gas emission, NATO decarbonisation*

Csató Péter, MSc

doktori hallgató

Nemzeti Közszolgálati Egyetem

Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

Katonai Műszaki Doktori Iskola

csato.peter@stud.uni-nke.hu

orcid.org/0000-0002-9515-5376

Péter Csató, MSc

PhD student

Ludovika University of Public Service

Faculty of Military Science and Officer Training

Doctoral School of Military Engineering

csato.peter@stud.uni-nke.hu

orcid.org/0000-0002-9515-5376

Beller Balázs

A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója II.

Mint sok veszélyes üzem, a légi közlekedés is csak elfogadott és elfogadhatatlan, azaz kezelendő kockázatok mentén valósítható meg. A cikk megírásának célja, hogy folytassa az 1960-as évektől megjelenő kockázatelemzési eljárások bemutatását, esetleges egymásra épülését, használhatóságát. Ismertetni kívánja azon kockázatelemzési és szemléltetési eljárásokat, amelyek a lineáris kockázatelemzési eljárásokon túl a komplex, többszörösen összetett rendszerek elemzésére is alkalmazhatók. A 2000-es évek után megjelenő modellek megértése, alkalmazása ugyanakkor legalább annyira nehéz, összetett feladat, mint azon rendszerek megértése, amelyek elemzésére ezen modellek készültek. A cikk többek között ezen komplex látásmód megértésében is próbál segítséget nyújtani. A választott kutatási módszer alapvetően a külföldi szakirodalom feldolgozásán alapult.

Kulcsszavak: kockázatelemzés, kockázatok kezelése, lineáris eseménymodell, komplex nemlineáris eseménymodell, FRAM, STAMP, STPA

1. Bevezetés

A cikk első részében áttekintettem a lineáris, ok-okozati kockázatelemzési eljárásokat, amelyek az 1960-as évektől kezdődően fejlődtek, és alkalmazásuk a 1970-es évektől válhatott általánossá. Ezen kockázatelemzési eljárásokat jelenleg is használják a légi közlekedés területén, annak ellenére, hogy azok gyökerét adott esetben más iparágak, veszélyes üzemek és folyamatok tervezése, végrehajtása során dolgozták ki. A tapasztalatok alapján ugyanakkor igény van a kockázatelemzési eljárások fejlesztésére is, kiváltképpen akkor, ha a vizsgált rendszerek, folyamatok komplexitása, integráltsági foka egyre magasabb szinteket ér el.

Egy bizonyos összetettségi szint felett problémát jelentenek a lineáris modellek korlátai, amelyekkel az erősen szoftverközpontú rendszerek elemzése csak egyszerűsítve dolgozható fel, és szükség volt és van ezen rendszerek elemzését is lehetővé tevő technikák kialakítására.

2. Baleseti modellek

A kockázatelemzési eljárások jelentős részben már egy korábban meglévő eseményelemzési – balesetek ok-okozati összefüggésének megállapítására szolgáló – modellre épülnek.

A kockázatelemzési eljárásokhoz használt modellek jelentős részét megtaláljuk a balesetek ok-okozati összefüggéseinek leírására használt modellek között. A balesetelemzési modellek fejlődése pedig alapvetően nyomon követhető a kockázatelemzési eljárások fejlődésén keresztül is, hiszen az események vizsgálatához hasonló elemzési eljárásra van szükség ahhoz, hogy a bekövetkezni vélt események kockázatait fel lehessen tární. Természetesen nem minden eseménymodell alkalmazható teljes mértékben kockázatelemzésre azok esetleges korlátai miatt, illetve nem minden kockázatelemzési eljárás alkalmazható teljes értékű eseménymodellként.

A baleseti vagy eseménymodelleket Erik Hollnagel¹ az alábbi felosztásban kezeli:

- lineáris (esemény)modell, azon belül egyszerű lineáris és összetett (komplex) lineáris (esemény)modell;
- komplex nemlineáris (esemény)modell [13, p. 3].

Az egyszerű lineáris modellek azt feltételezik, hogy a baleset olyan események vagy körülmények sorozatának eredménye, amelyek egymás után hatnak egymásra, és – ahogy azt már az előző cikkben megfogalmaztam – így a balesetek megelőzhetők az aktuális eseménysorozat egyik órájának kiküszöbölésével. Egyszerű lineáris modellek közé tartozik a hibafa- vagy az eseményfamodell is.

Az összetett (komplex) lineáris (esemény)modellek között is többféle irányvonal létezik. Ami nagyjából mindegyikre igaz, hogy az összetett lineáris modellek azon a feltételezésen alapulnak, hogy a balesetek a rendszeren belüli nem biztonságos cselekedetek, hibák és látens körülmények kombinációjának eredményei, amelyek lineáris utat követnek. A balesettől legtávolabbi tényezőket a szervezet vagy a környezet tevékenységeinek, míg a közvetlen kiváltó okokat a balesethez legközelebbi emberi kölcsönhatásoknak, hibáknak tulajdonítják. Ezek az egyszerű lineáris modellekből kifejlesztett kockázatelemzési, illetve baleset-megelőzési módszerek a kiváltó okok megtalálására és megszüntetésére, illetve az okokat elzáró biztonsági akadályok/korlátok felállítására összpontosítanak. Az 1970-es évektől a technológiai szint bonyolultabbá válása mellett a lineáris és az összetett lineáris modellek párhuzamosan fejlődtek. Ebben az evolúciós időszakban kifejlesztett kulcsfontosságú összetett lineáris modellek közé tartoznak az *energiakárosodási modellek*,² az *időbeli sorrendmodellek*,³ a *járványtani modellek*⁴ és a *rendszer szintű modellek*⁵ [13, p. 7].

Az összetett lineáris modellek közül a *energiakárosodási modellekben* a veszélyforrás egy potenciálisan károsító energia, és a veszélyforrást szabályozó mechanizmus meghibásodása következtében ezen energia kontrollálásának elvesztése balesetet, sérülést vagy kárt okozhat. Ezek a mechanizmusok magukban foglalhatják a fizikai vagy szerkezeti elszigetelést, biztonsági akadályokat, folyamatokat és működési eljárásokat. Derek Viner⁶ 1991-ben publikált könyvében úgy fogalmazott, hogy „a károsodás (sérülés) olyan beeső energia eredménye, amelynek intenzitása a befogadóval való érintkezés helyén meghaladja a befogadó károsodási küszöbértékét” [1, p. 42]. Ennek megfelelően az általa leírt modellben a veszélyforrást

¹ Erik Hollnagel pszichológus, egyetemi tanár, professor emeritus, PhD, Dél-dániai Egyetem, Dánia, Linköpingi Egyetem, Svédország.

² Energy Damage Model.

³ Time Sequence Model.

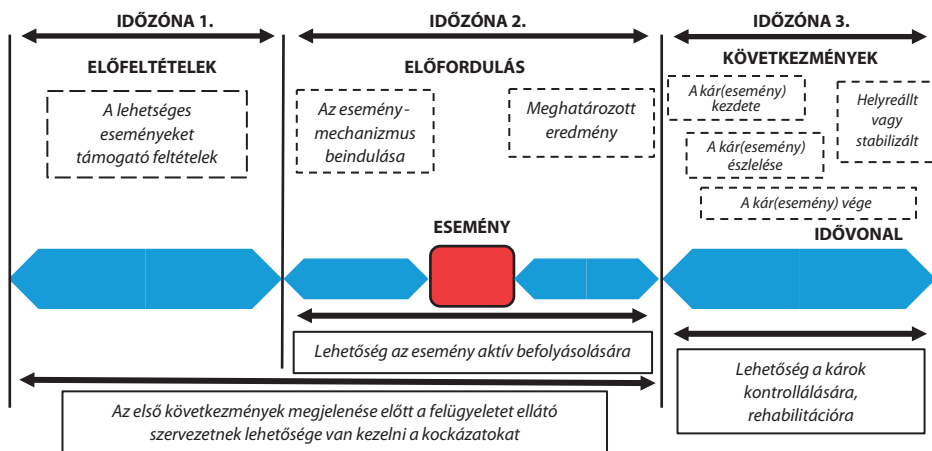
⁴ Epidemiological Model.

⁵ System Level Model.

⁶ Derek Viner biztonsági mérnök, egyetemi docens, CQ Egyetem, Ausztrália és Swinburne Egyetem, Ausztrália.

és a befogadót összeköti a térátviteli mechanizmus, vagyis az az eszköz, amellyel az energia és a befogadó összeér, feltételezve, hogy kezdetben távol vannak egymástól. A befogadó határa az a felület, amely az energiának kitett és az energiára érzékeny [13. pp. 7–8].

Az időbeli sorrendmodellek esetében az események időben egymást követve lépnek fel, egyrészt okozva az eseményt önmagát, másrészt az időben megjelenítve a következményeket. Ez a modell négy alapvető tulajdonságában tér el a lineáris eseménymodellektől. Az első ilyen tulajdonság a baleset kezdet- és végállapota meghatározásának szükségessége; a második a megtörtént események szekvenciális idővonalon történő ábrázolásának szükségessége; a harmadik a releváns tényezők feltárására szolgáló strukturált módszer szükségessége; a negyedik az események és körülmények meghatározására szolgáló grafikonzárási módszer alkalmazásának szükségessége [13, p. 8]. Az események itt nem egy láncon vagy logikai kapukon felfűzött történések/okok sorozataként jelennek meg, hanem egy külön időzónákra szakaszolt idővonalon ábrázoljuk őket.



1. ábra
Időbeli sorrendmodell (a szerző [13, p. 9] alapján)

Viner úgy véli, hogy az esemény-következmény lineáris sorrendben történő események elemzéséhez az időbeli sorrendmodell által biztosított struktúra felhívja a figyelmet azon ellenintézkedésekre, amelyek egyébként nem feltétlenül lennének nyilvánvalók. Az 1. ábrán látható 1. időzónában lehetőség van az esemény bekövetkezésének megakadályozására, amennyiben az esemény kezdeményezése és az esemény bekövetkezése között rendelkezésre áll megfelelő hosszúságú idő. A 2. időzóna figyelmeztet az eseménymechanizmus közelgő bekövetkezésére, és lehetőséget biztosít az esemény bekövetkezésének valószínűségét csökkentő lépések megtételére, míg a 3. időzónában lehetőség van a kimenet és a bekövetkezett esemény okozta károk mérséklésére, csökkentésére, adott esetben a következmények rehabilitációjára [13, p. 9].

A járványtani baleseti modellhez illeszkedő baleset-megelőzési módszerek a teljesítménybeli eltérésekre és a baleset látens okainak megértésére összpontosítanak. A korábbi modellektől eltérően a fókuszpontot a szervezetben lévő rejtett okok vagy körülmények

megértésére helyezi át. Ezen rejtett körülmények általában az eljárásrendektől való eltérésekben vagy a nem biztonságos cselekedetekben nyilvánulhatnak meg, és ezek megszűnése vagy megszüntetése megakadályozhatja a baleset megismétlődését [13, p. 11].

Ezen epidemiológiai modellek egyik jó példája a James T. Reason⁷-féle svájcisajt-modell, amely Hollnagel megítélése szerint a rendszerben megbúvó járványtani hatásmechanizmusra építő komplex lineáris modell. A balesetet a szervezet működésében vírusként lappangó, adott körülmény vagy cselekmény hatására aktiválódó rejtett körülmények és a végrehajtó által elkövetett kockázatos cselekmények (emberi hibák és normasértések) lineáris kombinációjának tulajdonítja. Reason a nem kívánt események elemzésének fő irányát az egyénről a szervezetre és annak vezetésére helyezte át, ugyanakkor a megelőzési tevékenység lehetőségeit az egyén elítélése, a hibáztatás, és szankció alkalmazása helyett továbbra is a rendszer védelmének megerősítésében látta [4], [13, p. 10], [8, p. 8].

Általánosságban elmondható, hogy a balesetek során elkövetett hibákat és az eltéréseket általában az adott terület felügyeletét ellátó (munkavédelmi, légi közlekedési és/vagy munkaügyi) hatóságok negatív kontextusban látják, természetüknél, illetve keletkezésük, létrehozásuk jogi gyökerei miatt szabálykövetési igénnyel lépnek fel, és a hibákat szankcionálandó területként fogják fel. A hatóságok által a rendszer védelmének érdekében kezdeményezett egyes programok, mint például a biztonságos viselkedést ösztönző oktatások, azt próbálják elérni, hogy a tevékenységekre vonatkozó szigorú szabályokat és eljárásokat a végrehajtó személyek, illetve az üzemeltető és az üzembentartó szervezetek mindig kövessék. Ugyanakkor a kockázat csökkentő, eseménymegelőzési, biztonságos működést előtérbe helyező gondolkodás egyre inkább annak megértése felé halad, hogy miként lehet olyan megfelelően rugalmas működésű rendszert létrehozni, amely negatív következmények nélkül ellenáll az esetleges eltéréseknek vagy a szokatlan cselekedeteknek [13, p. 11].

Az 1980-as években egyes kutatók⁸ a valóságban végbement baleseti események vizsgálata során úgy találták, hogy a nem kívánt események bekövetkezése nem lineáris, ennek következtében szükség van olyan modellekre, amelyek a balesetek leírásánál azok komplexitását is tükrözik, azaz „egy reális baleseti modellnek fel kell tudnia mutatni az események szekvenciális és egyidejű, nemlineáris lefolyását, és tükröznie kell az események időbeli kölcsönhatásait” [13, p. 11]. Az erre irányuló kutatói munka egyik eredménye a *rendszerszintű modellek* megjelenése. Hollnagel szerint a rendszerszintű modellek alaptétele, hogy a balesetek fő okozói a rendszerhibák, és nem csak az emberi mulasztás [4]; ennek következtében a kutatók elkezdtek foglalkozni néhány olyan iránnyal (ide nem értve a nemlineáris koncepciókat), amely megmutatta, hogy az események nem történnek elszigetelten attól a rendszerszintű környezettől, amelyben bekövetkeznek.

A terület egyik kutatója, Jens Rasmussen⁹ a balesetek elemzése során részletesen foglalkozott az ok-okozati összefüggés problematikájával, és a közvetlen ok-okozati összefüggés, az idővonal és a baleseti modellezés közötti kapcsolat leírásához a filozófiából vett át fogalmakat. Rasmussen azt vizsgálta, hogy a valós világ eseményeit és tárgyait fel lehet-e bontani részletekre, és a tényleges okozati rendszerüket meg lehet-e magyarázni a baleset bekövetkezésére utaló ok-okozati összefüggések útján, ahol a korábbi események vagy cselekmények

⁷ James T. Reason pszichológus, a Brit Birodalom lovagja, a Manchesteri Egyetem korábbi professzora, Anglia.

⁸ Többek között Ludwig Benner, Jens Rasmussen és James T. Reason.

⁹ Jens Rasmussen (1926–2018) rendszerbiztonsági és emberi tényező kutató, Risø Nemzeti Laboratórium, Dánia.

lappangó hatásai is szunnyadnak. Rasmussen felismerte, hogy a társadalmi-technikai rendszerek egyszerre összetettek és instabilak. Véleménye szerint az események lefolyásának tárgyalására tett kísérletek nem veszik figyelembe, hogy „az események és feltételek közötti kölcsönhatás zárt hurkai az egyéni és szervezeti alkalmazkodás magasabb szintjét jelentik [...] a balesetelemzés által talált ok-okozati fa csak egy múltbeli eset feljegyzése”, nem pedig az érintett esemény tényleges „kapcsolati struktúra modellje” [7, p. 454].

3. A komplex nemlineáris modellek megjelenése

A balesetek modellezésével kapcsolatos gondolkodás a *rendszerszintű modellek* megjelenése után tovább fejlődött, mivel egyes kutatások szerint a balesetek úgy tekinthetők, mint a valós környezetben előforduló, kölcsönhatásban lévő változók kombinációinak eredménye, és csak e több tényező kombinációjának és kölcsönhatásának megértése révén lehet a baleseteket valóban megérteni és megelőzni [13, pp. 3–4].

Ennek eredményeként az 1980–1990-es években megjelentek a komplex nemlineáris eseménymodellek, és kifejlesztésük bizonyos szempontból párhuzamosan zajlott az egyszerű lineáris, komplex lineáris eseménymodellek alkalmazásával, fejlődésével együtt. A 2000-es évek elejére két nagy komplex nemlineáris eseménymodell született meg. Az egyik a Hollnagel-féle funkcionális rezonancia baleseti modell¹⁰ (FRAM), a másik a Nancy G. Leveson¹¹ által kidolgozott rendszerelméleti baleseti modell és folyamat elemzés¹² (STAMP).

A cikk elsősorban ezen modellek bemutatására és az azokra alapuló kockázatelemzési eljárások ismertetésére törekszik.

4. A FRAM-módszer ismertetése

Erik Hollnagel tanulmányozta a baleseti eseménymodellek, az ok-okozati összefüggések és az esemény bekövetkezését befolyásoló tényezőket, amelyek során az emberi/kognitív megbízhatóságot és az ember-gép interfészt vizsgálva eljutott oda, hogy az emberi munkavégzés, illetve tevékenység jelenléte mellett kialakított, rendkívül összetett és szorosan összekapcsolt társadalmi-technikai rendszerek vizsgálatában bevezette a balesetek háromdimenziós gondolkodásmódjának koncepcióját. Megállapításai szerint ezen rendszermodelleket szorosan összekapcsoltnak kell tekinteni, és ennek megfelelően kell vizsgálni. Elgondolása szerint a szervezetek biztonsági céljait pedig úgy kell meghatározni, hogy azok a korlátok és védekező mechanizmusok felállítása helyett inkább olyan rendszerekre összpontosítsanak, amelyek képesek az eltérések nyomon követésére és ellenőrzésére, valamint lehetővé tegyék, hogy a rendszerek (emberi) hibatűrők legyenek [13, p. 17].

A FRAM a komplex rendszerszintű balesetek elméletén alapul, ugyanakkor abból az alap-koncepcióból indul ki, hogy a rendszer eltérései és túréhatárai akkor vezetnek balesethez, ha a rendszer normál üzemmódban nem képes elviselni az ilyen eltéréseket. A biztonsági

¹⁰ Functional Resonance Accident Model.

¹¹ Nancy G. Leveson professzor, rendszer- és szoftverbiztonsági kutató, egyetemi tanár, Massachusettsi Műszaki Egyetem, Cambridge, Amerikai Egyesült Államok.

¹² System-Theory Accident Model and Process.

rendszerek/alrendszerek működési eltéréseit a szakemberek a legtöbb alkalmazott rendszer esetében normálisnak tekintik, ugyanakkor ezen eltérések azok, amelyek reprezentálják az összetett rendszerek működéséhez szükséges változó teljesítményt, beleértve a tervezés korlátait, a technológia tökéletlenségeit, a munkakörülményeket és a bemenetek olyan kombinációit, amelyek általában lehetővé tették a rendszer működését. Az emberek és a társadalmi rendszerek, amelyekben tevékenykednek, szintén a rendszer változékonyságát képviselik, különös tekintettel arra, hogy az embereknek alkalmazkodniuk kell, és kezelniük kell az idővel és a hatékonysággal kapcsolatos követelményeket is [4, p. 168].

4.1. A kockázatkezelés társadalmi-technikai megközelítése

Hollnagel elmélete alapvetően abban különbözik a korábban kialakított modellektől, hogy szerinte a társadalmi-technikai rendszerek biztonsága és a rendszerekben fellépő kockázatok megértése nem konzervatív megközelítéssel, hanem attól eltérő úton érhető el. Véleménye szerint a kockázatértékelés bevett megközelítési módszerei mind megkövetelik, hogy a rendszert részletesen le lehessen írni, például egy sor forgatókönyvre és a megfelelő szükséges funkcióra való hivatkozással. Más szóval, a rendszernek követhetőnek kell lennie [3, p. 14].

Álláspontja szerint társadalmi-technikai rendszerek, ideértve például az atomerőműveket vagy a magas integráltsági fokú légi közlekedési rendszereket, repülőgépeket is, általában nehezen kezelhetők. Ez azt jelenti, hogy a bevált módszerek nem feltétlenül alkalmasak esetükben. Az sem megfelelő megoldás, hogy a rendszerleírásokat annyira leegyszerűsítsék, hogy azok a gyakorlatban követhetővé váljanak. Ezért olyan megközelítéseket kell keresni, amelyek a nehezen kezelhető rendszerek, azaz a hiányos vagy alulspecifikált rendszerek esetében is alkalmazhatók [3, p. 14]. Hollnagel álláspontja szerint az ellenálló képességre fókuszáló mérnöki tevékenység (Resilience Engineering), a rendszerek rugalmas és ellenálló tervezése – a társadalmi-technikai rendszerszemléleten belül – egy ilyen megközelítést képvisel.

A kockázat és a biztonság hagyományos megközelítései a „hibák” számbavétele és a meghibásodási valószínűségek kiszámítása érdekében a rendszerek felépítésének és folyamatainak részletes leírásától függenek. A rugalmas, ellenálló tervezés helyett a jellemző folyamatok, funkciók leírásából indul ki, és azt keresi, hogyan lehet javítani a szervezet azon képességét, hogy megfelelően robusztus, de rugalmas folyamatokat hozzon létre. Emellett miként lehet megvalósítani azt, hogy a szervezet önmaga figyelemmel kísérje és felülvizsgálja a kockázati modelleket, és hogy proaktívan használja az erőforrásokat a váratlan fejleményekkel vagy a folyamatos termelési és gazdasági nyomással szemben [3, pp. 14–15].

A FRAM-módszer megértéséhez és alkalmazásához figyelembe kell venni a Hollnagel által kidolgozott, a társadalmi-technikai rendszerekre vonatkozó alapelveket:

1. *alapelv:* A siker és a kudarcok egyenértékűsége. A bonyolult rendszerekben a teljesítményfeltételek mindig alulméretezettek, specifikáltak, például sohasem áll annyi erőforrás rendelkezésre, mint amennyire számítunk. Mivel egy folyamat, rendszer működése során elvégzett munkateljesítményt nem lehet minden részletre kiterjedően meghatározni, az egyéneknek és a szervezeteknek mindig az aktuális feltételekhez kell igazítaniuk teljesítményüket. Mivel az erőforrások és az idő végesek, a teljesítmény ilyen kiigazításai menthetetlenül közelítő jellegűek lesznek, ebből kifolyólag a teljesítmény változékonysága elkerülhetetlen, ami egyben a siker és a kudarc forrása is [3, p. 15]. Ezekből kifolyólag a siker így annak a következménye, hogy

a csoportok, egyének és szervezetek képesek előre látni a kockázat változékonyságát, mielőtt a kár bekövetkezik; a kudarc pedig egyszerűen ennek átmeneti vagy tartós hiánya [3, p. 44].

2. *alapelv*: A „közelítő kiigazítások” elkerülhetetlenség. Sok kedvezőtlen esemény az alkatrészek és a rendszer normál funkcióinak meghibásodására vagy hibás működésére vezethető vissza, ellenben nagyon sok esemény nem ezek miatt következik be. Az ilyen nehezen kezelhető események leginkább úgy értelmezhetők, mint a normál teljesítményváltozékonyság váratlan kombinációinak eredménye. A nemkívánatos eseményekre ezért úgy szükséges tekinteni, mint a valós világ komplexitásával való megbirkózáshoz szükséges alkalmazkodási képesség fordítottja [3, p. 15].

Ebben a szemléletben a rendszer normális működésének változékonysága két alapvető tényből fakad. Ahogy a korábbi elvnel megfogalmaztam, egyrészt a működési feltételek általában alulméretezettek, ezért ritkán vagy soha nem úgy vannak biztosítva, mint ahogyan azt eltervezték vagy előírták.¹³ Ez azt jelenti, hogy a gyakorlatban lehetetlen előre olyan részletes utasításokat készíteni, amelyeket pontosan be lehet tartani. A megoldás ehelyett az, hogy olyan iránymutatásokat és eljárásokat adunk meg, amelyek a konkrét cselekvések alapjául szolgálhatnak. Az iránymutatásokat és az eljárásokat általában széles körű szakmai képzéssel szükséges támogatni.

Másrészt a működési feltételek dinamikusan, többé-kevésbé szabályozott módon változnak. A változó körülmények miatt azon személyeknek, akiknek egy adott helyzetben cselekedniük kell, legyenek akár vezetők, akár üzemeltetők, csak rövid távra tudnak biztonsággal tervezni. Emiatt folyamatosan készen kell állniuk arra, hogy terveiket felülvizsgálják, és a tervek végrehajtását az aktuális körülményekhez igazítsák. Ez a változékonyság nemcsak a rendszer pillanatnyi működését jellemzi, hanem a rendszer teljes élettartama alatt – az életciklus kezdetétől a végéig – fennáll. Ahhoz, hogy az emberek bármit el tudjanak végezni, mindig az aktuális körülményekhez kell igazítaniuk teljesítményüket. Az ember mint entitás szerencsére képes arra, hogy hatékony módszereket találjon a munkahelyi problémák leküzdésére, és ez a képesség döntő fontosságú a biztonság szempontjából is. Amennyiben az emberek váratlan események esetén mindig mereven követnék a szabályokat és az eljárásokat, sokkal több baleset és incidens lenne. Az emberi teljesítmény tehát egyszerre növelheti és csökkentheti a rendszer biztonságát. A rendszer értékelési módszereinek képesnek kell lenni e kettősség kezelésére [3, p. 45].

3. *alapelv*: A következmények kialakulnak. A hatékony biztonságirányítás nem alapulhat utólagos mérlegelésen, és nem támaszkodhat hibatáblázatokra és a meghibásodási valószínűségek kiszámítására. Az irányításelmélet általános tézise, hogy a hatékony irányítás nem hagyatkozhat kizárólag a visszacsatolásra, kivéve a nagyon egyszerű rendszereket. A hatékony irányítás megköveteli, hogy a válaszokat adott esetben előre elkészítsék, és néha idő előtt végrehajtsák azokat, azaz *feedforwardot* (előreccatolást) alkalmazzanak. Ezért nem elegendő, ha a biztonságirányítást a kedvezőtlen kimenetek számbavételére alapozzuk, mivel ezek diszkrét események, amelyek kizárják a rendszer dinamikáját [3, p. 15].

A normál teljesítmény változékonysága önmagában ritkán elég nagy ahhoz, hogy baleset okozója legyen, vagy akár üzemzavarnak minősüljön. Több funkció változékonysága azonban váratlan módon kombinálódhat – funkcionális rezonancia lép fel –, ami aránytalanul nagy következményekhez vezethet, és így nemlineáris hatásokat eredményezhet. Mind a meghibásodások,

¹³ Ez a társadalmi-technikai rendszerek megoldhatatlanságának következménye [3, p. 45].

mind a normális teljesítmény inkább „felbukkanó tulajdonság”,¹⁴ mint eredő jelenség, mivel egyik sem magyarázható kizárólag bizonyos alkatrészek vagy részek funkcióira vagy meghibásodásaira való hivatkozással, vagy nem tulajdonítható annak. A társadalmi-technikai rendszerek nehezen kezelhetők, mert a körülményekre és az igényekre reagálva változnak és fejlődnek. Ezért lehetetlen leírni a rendszer összes kapcsolódási pontját, és lehetetlen a legszabályosabb eseményeknél többet előre jelezni [3, p. 46].

4. *alapelv*: Funkcionális rezonancia. Rendszerszemléletű megközelítésként a FRAM leküzdözi a bevett módszerek belső korlátait azáltal, hogy a rendszerfunkciók közötti kapcsolatokra összpontosít. A FRAM a hagyományos ok-okozati összefüggést is a rezonancia elvével helyettesíti. Ez azt jelenti, hogy több funkció változékonysága időről időre rezonálhat, abban az értelemben, hogy egymást erősíthetik, és ezáltal az egyik funkció változékonysága meghaladhatja a normális határokat.¹⁵ A következmények inkább szoros kapcsolódásokon keresztül terjedhetnek, mint azonosítható és megszámlálható ok-okozati kapcsolatokon keresztül. A rezonancia analógia hangsúlyozza, hogy ez egy dinamikus jelenség, tehát nem az oksági kapcsolatok egyszerű kombinációjának tulajdonítható. Ez az elv lehetővé teszi a rendszerműködés jellegzetes dinamikájának megragadását, tehát olyan „felbukkanó” rendszertulajdonságok azonosítását, amelyek nem érthetők meg, még akkor sem, ha a rendszert izolált összetevőkre bontjuk [3, p. 47].

A fentiek mellett fontos kiemelni, hogy Reasonhoz hasonlóan úgy ítéli meg, hogy a biztonságot nem lehet elszigetelten kezelni az alapvető (például üzleti, működési) folyamatoktól, és ez fordítva is igaz. A biztonság a termelékenység előfeltétele, a termelékenység pedig a biztonságé. A biztonságot inkább fejlesztésekkel érjük el, nem pedig korlátozásokkal [3, p. 15].

4.2. A társadalmi-technikai rendszerek biztonsága

Hollnagel szerint a társadalmi-technikai komplex rendszerek biztonsága négy alapvető feltételtől függ:

1. A rendszer vagy szervezet képes-e a rendszeres és szabálytalan fenyegetésekre robusztus, ugyanakkor rugalmas módon reagálni.
Egyetlen rendszer sem maradhat fenn anélkül, hogy ne tudna valahogy reagálni, ha valami rosszul sül el. Valójában ez a reaktív biztonságirányítás lényege. Sok rendszer azonban csak korlátozottan képes, vagy éppen nem képes a váratlan igényekhez igazítani a reakcióit.
2. A rendszer vagy szervezet rugalmasan képes-e nyomon követni, hogy mi történik, beleértve a saját teljesítményét is.
Erre a tulajdonságra minden olyan rendszer esetében szükség van, amely dinamikus és kiszámíthatatlan környezetben létezik. Magának a nyomon követésnek továbbá

¹⁴ A szakirodalom által *Emergent Property*nek nevezett, olyan (biztonsági) rendszertulajdonságok, amelyek nem az egyes összetevők összegzésében jelennek meg, hanem az összetevők kölcsönhatásakor „keletkeznek”. A „felbukkanó” tulajdonságok csak akkor kezelhetők megfelelően, ha figyelembe vesszük valamennyi technikai és társadalmi aspektusukat [9, p. 10].

¹⁵ Az eredmény természetesen lehet előnyös és hátrányos is, habár a természetes okok miatti biztonság tanulmányozása az utóbbira összpontosít.

nyitottnak kell lennie a kritikai értékelésre, hogy a rendszer ne hagyatkozzon olyan bevett gyakorlatokra, amelyek már nem feltétlenül megfelelők.

3. A rendszer vagy szervezet hosszabb távon előre látja-e a kockázatokat és a lehetőségeket.

A lehetséges események előrejelzésének túl kell mutatnia a klasszikus kockázatelékelésen, és nemcsak az egyes eseményeket kell figyelembe vennie, hanem azt is, hogy azok hogyan kombinálódhatnak és hogyan befolyásolhatják egymást. Míg sok rendszernél van valamilyen mértékű nyomon követés, csak kevés esetben tesznek jelentős erőfeszítéseket az előrejelzésre, legalábbis ami a biztonságot illeti.

4. A rendszer vagy szervezet képes-e a tapasztalatokból tanulni.

A tanuláshoz többre van szükség, mint a balesetek, incidensek és balesetközeli esetek adatainak gyűjtésére, vagy egy vállalati szintű adatbázis létrehozására. Míg az adatok viszonylag könnyen és többé-kevésbé rutinszerűen vagy eljárászerűen összegyűjthetők, addig a tapasztalatok feldolgozása általában folyamatos, jelentős erőfeszítéseket és időt igényel [3, p. 16].

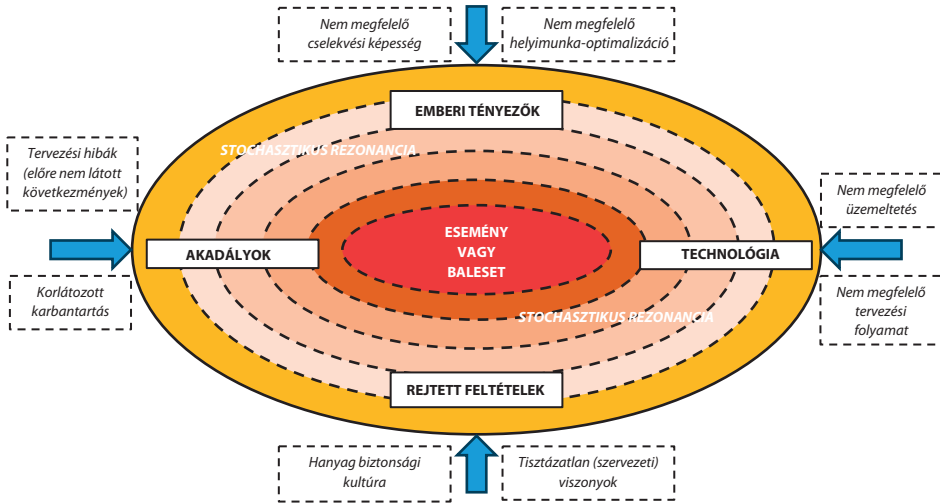
Mind a négy tulajdonság döntően attól függ, hogy a szervezet milyen modellel rendelkezik önmagáról, azaz arról, hogyan látja saját magát és mit csinál, valamint arról a környezetről, amelyben létezik. A kialakított modell szempontjából a szervezetben és a szervezet körül zajló folyamatok természetére vonatkozó feltételezések, az oksági kapcsolatok nagy jelentőséggel bírnak. Ez a modell, illetve ezek a feltételek különösen fontosak a balesetek kivizsgálása és a kockázatelékelés szempontjából, mivel alapvetően meghatározzák, hogy mit vesznek figyelembe az elkészítése során, és hogyan írhatók le a rendszer összetevői közötti kapcsolatok [3, p. 17].

4.3. A FRAM alapjai

Hollnagel felismerte, hogy az összetett (társadalmi-technikai) rendszerek nagyszámú alrendszerből és komponensből állnak, és a teljesítményváltozások rendszerint elnyelődnek a rendszeren belül, kevés negatív hatással az egész működésére. A teljesítményváltozékonyság négy fő forrását azonosította:

1. emberek – az emberi teljesítőképesség variabilitása;
2. technológia – a technológiában rejlő problémák, meghibásodások;
3. látens feltételek (rejtett körülmények);
4. akadályok (védelmi vonalak) – hiányzó vagy nem megfelelő védelmi vonalak.

Hollnagel elgondolása szerint amikor a rendszeren belüli változók túl nagyok lesznek ahhoz, hogy a rendszer elnyelje őket; esetleg az emberek, a technológia, a rejtett körülmények és a védelmi vonalak, ezen alrendszeri változók kombinációja révén az eredmény nem észlelhető, és a rendszer működésében nem kívánt eredmények keletkeznek, vagyis „funkcionális rezonancia” lép fel, akkor a rendszer nem tud megbirkózni a normál működési módjával, illetve végső soron a normál működést megzavaró, attól eltérő üzemmódokkal.



2. ábra
A FRAM általános modellje (a szerző [13, p. 18] alapján)

Az 2. ábra azt mutatja meg, hogy a változékonyság négy forrása különböző mértékben hathat egy rendszer működésére, amely a behatásokat igyekszik elnyelni, addig a pontig, amikor az egyes hatások által a rendszerben keltett sztochasztikus rezonancia eredményeként bekövetkezik az esemény vagy a baleset.

A FRAM végrehajtása emellett azt is bemutatja, hogy egy szervezetben belül a különböző funkciók hogyan kapcsolódnak más funkciókhoz. Külön hangsúlyt kap az egyes funkciók változékonyságának megértése, és hogy ez a változékonyság hogyan kezelhető [4, p. 171].

4.4. A FRAM által leírt folyamatok aspektusai

A FRAM a rendszerhibákat (káros eseményeket) a normál teljesítmény változékonyságából eredő funkcionális rezonancia eredményeként írja le. A módszer az egyéni és/vagy szervezeti funkciók modelljére vagy ábrázolására utal, ahol az egyes funkciók jellemzői adják az alapot a potenciális változékonyság leírásához. A rezonancia elvére hivatkozva magyarázható meg, hogy a kis vagy akár a jelentéktelen eltérésekből hogyan keletkezhetnek aránytalanul nagy hatások.¹⁶ A hangsúly inkább a dinamikus függőségeken van, mint a meghibásodási valószínűségeken. A funkciók/folyamatok közötti kapcsolatokat hat függőségi viszony vagy szempont (bemenet, kimenet, idő, irányítás, előfeltételek és erőforrások) segítségével írjuk le, és ezek inkább potenciálisak, mint ténylegesek, azaz nincsenek előre meghatározott ok-okozati kapcsolatok [3, p. 43]. A függőségi szempontok részletesebben kibontva az alábbiak:

¹⁶ Hullámerősítés, interferencia.

1. *Bemenet*. A folyamat végrehajtásához szükséges anyag, energia, információ, amely elindítja magát a cselekvést, vagy átalakul a *Kimeneten* megjelenő „kimeneti eredményé”. A FRAM szempontjából ugyanakkor bemenetnek számít akár egy olyan jel is, amely aktiválja, elindítja a folyamatot, azaz egy utasítás, parancs is annak tekinthető [2, p. 9].
2. *Kimenet*. A folyamat végrehajtásának eredményeként jön létre.¹⁷ Emellett ugyanakkor a *Kimenet* akár a vizsgált rendszerben egy vagy több részfolyamat kimeneti paraméter állapotváltozását is leírhatja, így lehet például egy másik folyamat indításának jele is [2, p. 9].
3. *Előfeltételek*. Sok esetben előfordulhat, hogy egy funkciót vagy folyamatot nem lehet elindítani, amíg egy vagy több előfeltétel nem áll rendelkezésre. Ezek az előfeltételek olyan rendszerállapotokként értelmezhetők, amelyeket a folyamat végrehajtása előtt feltétlenül ellenőrizni kell. Az előfeltétel azonban önmagában nem jelenti a függvényt elindító jelet, azaz csak a *Bemenet* indíthatja el a folyamatot [2, pp. 9–10].
4. *Erőforrások*. Az erőforrás olyan dolog, amelyre egy folyamat végrehajtása során van szükség, vagy amelyet a folyamat végrehajtásához felhasználunk. Az erőforrás lehet anyag, energia, információ, szakértelem, szoftver, eszköz, munkaerő stb. Mivel az egyes erőforrások a folyamat végrehajtása során elfogynak, mások pedig nem, célszerű különbséget tenni egyrészt a *(megfelelő) erőforrások*, másrészt a *végrehajtási feltételek* között. Egy (megfelelő) erőforrást egy folyamat fogyaszt el, annak mennyisége idővel csökken, ezért meg kell újítani vagy pótolni kell. Egy végrehajtási feltételnek csak akkor kell rendelkezésre állnia vagy léteznie, amikor egy folyamat aktív, de nem fogy el, mint egy (megfelelő) erőforrás. Az *Előfeltétel* és a végrehajtási feltétel között az a különbség, hogy az előbbire csak a folyamat elindítása előtt van szükség, nem a végrehajtása közben [2, p. 10].
5. *Irányítás*. Az irányítás az, ami úgy felügyeli vagy szabályozza a folyamatot, hogy az a kívánt kimeneti eredményt produkálja. Az irányítás lehet egy terv, ütemterv, eljárás, illetve irányelvek vagy utasítások összessége, egy program (algoritmus) stb. Az irányítás másik, kevésbé formális típusa a társadalmi kontroll vagy a munka elvégzésének módjára vonatkozó elvárások. A társadalmi kontroll lehet külső, például mások (vezetőség, szervezet, munkatársak) elvárásai, amelyek néha kifejezetten erősen befolyásolhatják a végrehajtást, és lehet belső is, például amikor megtervezünk egy munkát, és mentálisan végiggondoljuk, hogy mit, mikor és hogyan kell elvégezni, vagy amikor azt gondoljuk át, hogy mások mit várnak el tőlünk egy folyamat végrehajtása során [2, p. 10].
6. *Idő*. Az idő több szempontból befolyásolhatja egy folyamat vagy funkció végrehajtását. Az idő vagy inkább az időbeli viszonyok az *Irányítás* egyik formájának is tekinthetők, mint amikor az idő két vagy több cselekvés sorrendjét (szekvenciafeltételek) jelenti.¹⁸ Az idő vonatkozhat önmagában egy folyamatra is, akár az órádőhöz, akár az eltelt időhöz viszonyítva. Az időt értelmezhetjük *Erőforrásként*¹⁹

¹⁷ Például egy folyamat a Bemeneten beérkező adatok feldolgozásának eredményeként felhasználható információt biztosít a Kimeneten [2, p. 9].

¹⁸ Egyes rendszerekben egy folyamatot például egy másik folyamat előtt, egy másik folyamat után vagy egy másik folyamattal átfedésben – párhuzamosan – kell végrehajtani (vagy befejezni) [2, p. 10].

¹⁹ Például amikor valamit egy bizonyos időpont előtt vagy egy bizonyos időtartamon belül kell befejezni [2, p. 10].

vagy *Előfeltételként*²⁰ is. Mégis, ahelyett, hogy az *Időt* a másik három függőségi szempont egyikének részeként tartanánk számon, észszerű önálló aspektusként kezelni [2, pp. 10–11].

A függőségi szempontok segítségével meghatározható, hogy két folyamat vagy cselekvés a teljesítményfeltételek függvényében összekapcsolható-e egymással. Ily módon lehetőség nyílik a szándékolt és a nem szándékolt csatolások azonosítására. A balesetvizsgálat esetén ez arra használható, hogy megtaláljuk, hol keletkezhettek egybeesések, amelyek negatívan befolyásolták a normál működést; kockázatértékelés esetén pedig arra, hogy megmagyarázzuk, hogyan keletkezhetnek egybeesések a teljesítmény változékonyságából, és így azonosítsuk a potenciális kockázatokat egy adott helyzetben [3, p. 43].

4.5. A FRAM-módszer lépései

Jelenlegi formájában a FRAM-módszer a következő öt lépésből áll:

1. *Az első lépés az elemzés céljának meghatározása*, mivel a FRAM-ot úgy fejlesztették ki, hogy mind a balesetek kivizsgálására (múltbeli események), mind a biztonság értékelésére (jövőbeli események) használható legyen.
2. *A második lépés a rendszerfunkciók (folyamatok) azonosítása és leírása*. Egy funkció (folyamat) a FRAM szempontjából olyan tevékenységet jelent, amely fontos vagy szükséges következményekkel jár egy másik tevékenység állapotára vagy tulajdonságaira nézve.
3. *A harmadik lépés az egyes egyedi funkciók (folyamatok) potenciális változékonyságának felmérése és értékelése*. A javasolt módszertan a folyamatok teljesítményének változékonyságát befolyásoló közös feltételek egy halmazának előzetes értékelését használja. A közös feltételek a Hollnagel által leírt közös teljesítményfeltételekből származnak. Ezt az értékelést össze kell vetni a baleseti adatbázisból kinyert retrospektív információkkal, amennyiben az adatok rendelkezésre állnak.
4. *A negyedik lépés a funkcionális rezonancia azonosítása*. E lépés célja annak meghatározása, hogy az egyik funkcióból származó változékonyság milyen módon terjedhet el a rendszerben, és hogyan kombinálódhat más funkciók változékonyságával. Funkcionális rezonancia esetén a változékonyság kombinációi olyan helyzeteket eredményezhetnek, amelyekben a rendszer elveszíti a változékonyság biztonságos kezelésére való képességét. A terjedés történhet közvetlenül egy funkció vagy folyamat kimenetén keresztül, és közvetve azon hatásokon keresztül, amelyeket a változékonyság a közös feltételekre gyakorolhat.
5. *A FRAM elemzés ötödik és egyben utolsó lépése a rendszerben bevezetendő hatékony ellenintézkedések azonosítása*. A FRAM tekintetében az ellenintézkedések célja a teljesítményváltozékonyság csillapítása a rendszer biztonságos állapotban tartása

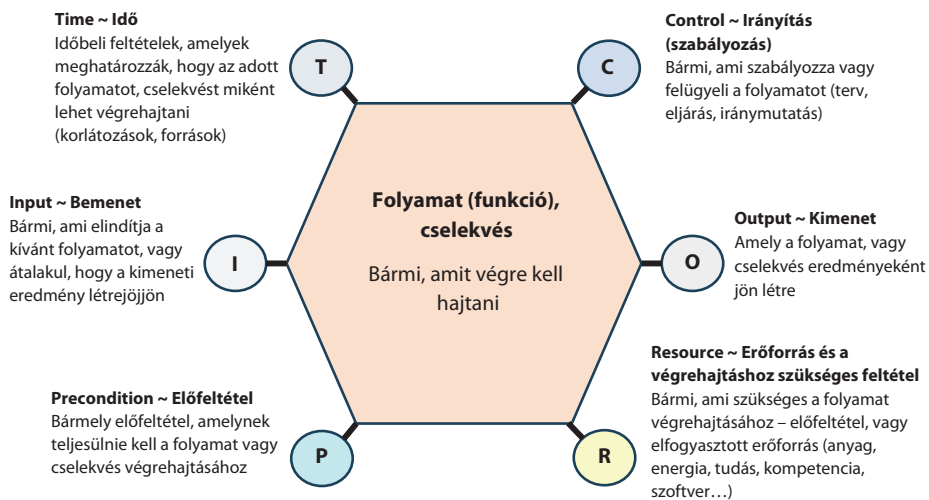
²⁰ Például úgy, hogy egy folyamat nem kezdődhet el egy bizonyos idő előtt, vagy hogy nem kezdődhet el egy másik folyamat befejezése előtt [2, p. 10].

érdekében. A rugalmas tervezés elvével azonban összhangban van, hogy olyan intézkedéseket is figyelembe kell venni, amelyek fenntarthatják vagy felerősíthetik a kívánt vagy jobb eredményekhez vezető funkcionális rezonanciát [3, p. 49].

4.6. A FRAM-módszer szemléltetése

A FRAM-módszerhez tartozik a fejlesztők honlapján²¹ elérhető, a módszer ábrázolását elősegítő, az egyes események közötti kapcsolatokat láthatóvá tevő szoftver,²² valamint egy másik, táblázatos formátumú, az egyes folyamatok megértését elősegítő alkalmazás.²³

A FRAM-módszer a szemléltetés alapjaként egy hatszögletű alapábrát alkalmaz, amely mindig egy adott eseményt, cselekvés lépését tartalmazza (3. ábra). Az egyik funkció változékonysága más funkciók változékonyságát is befolyásolhatja. A hatszög csúcsai a FRAM – korábban már említett – függőségi viszonyai, aspektusai, amelyek egyben kapcsolódási pontként szolgálnak több esemény, cselekvés – mint további hatszögek – összekötéséhez. Ahogy korábban már leírtuk, a hatszög csúcsai olyan függőségi viszonyokat jelentenek, amelyek inkább potenciálisak, mint ténylegesek, azaz nincsenek előre meghatározott ok-okozati kapcsolatok. A függőségi kapcsolatok segítségével megjeleníthető, hogy a két cselekvés a teljesítményfeltételek függvényében összekapcsolható-e egymással [2, p. 11].



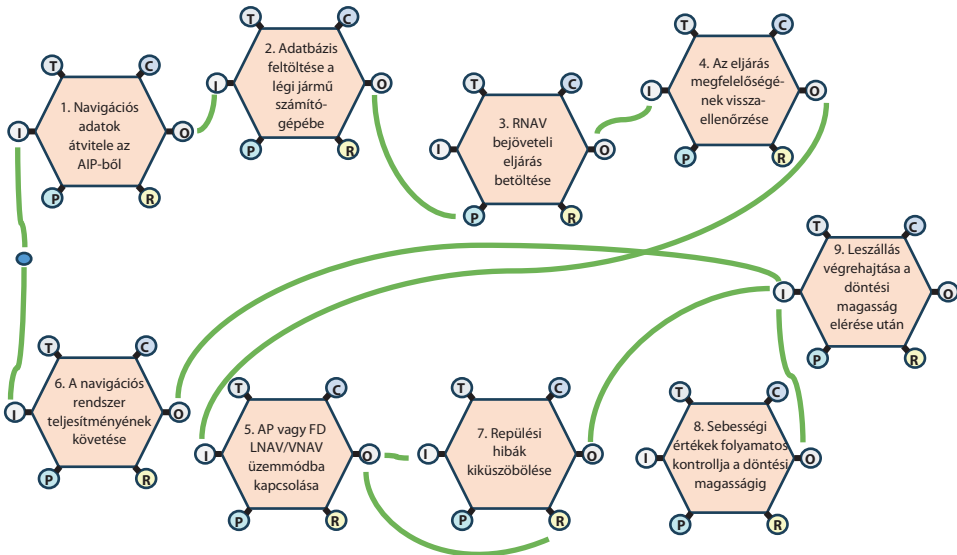
3. ábra
A FRAM alapeleme és a hat aspektusa (a szerző [2, p. 11] alapján)

²¹ Lásd: <https://functionalresonance.com/the-fram-model-visualiser/>

²² FRAM Model Visualiser (FMV).

²³ FRAM Model Interpreter (FMI) – 2019-től [4].

Erik Hollnagel és Örjan Goteman²⁴ közös cikkben [6] elemezte a FRAM alkalmazásával a területi navigációra épülő²⁵ (RNAV) bejveteli eljárás végrehajtását. Anélkül, hogy ismertetnénk a 2004-es publikáció tartalmát és a bejveteli eljárás részletes FRAM-elemzését, a 4. ábra leképezi az RNAV bejveteli eljárás végrehajtását mint a „rendszer” normál állapotát a FRAM-modell alkalmazásával megjelenítve.

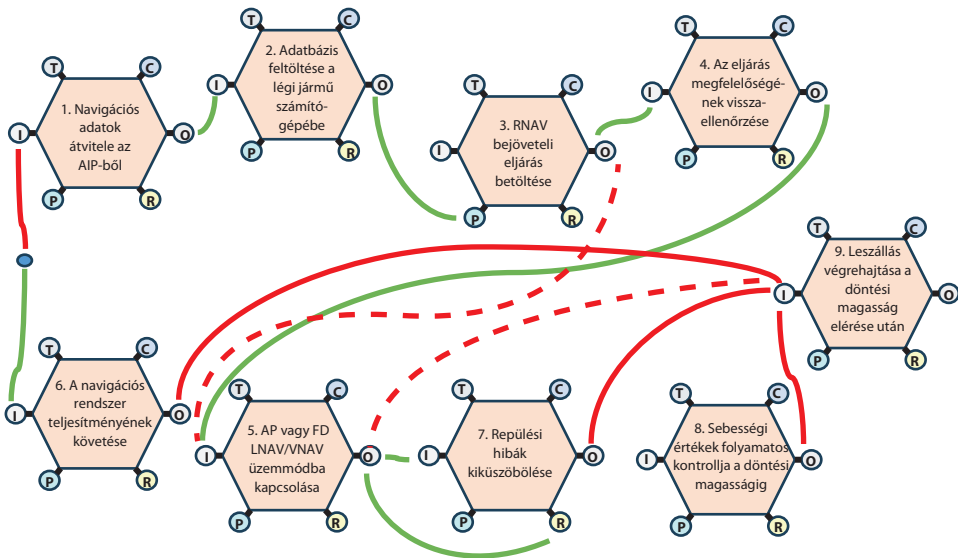


4. ábra
Az RNAV bejveteli eljárás normál működési állapota (a szerző [6, p. 7] alapján)

A 4. ábrán kilenc lépésben (a folyamat összefűzésével) jelenik meg a vizsgált RNAV bejveteli eljárás. A FRAM-elemzés során minden egyes folyamat esetében meg kell határozni annak leíró jellemzőit (mi kell az adott folyamat indításához, mennyi ideig fog működni, mi lesz a kimeneten stb.), majd ezek ismeretében kialakíthatók a folyamatok közötti kapcsolatok. A fő kapcsolatok alapvetően a kimenetek és a bemenetek között vannak, azonban egyes esetekben a kimenetek és az erőforrások között is megjelennek, ami azt jelenti, hogy az egyik folyamat kimenete egy másik folyamat számára erőforrás. A 4. ábra azt is megmutatja, hogy a függőségek nem a folyamatok egyszerű sorrendjét jelentik, hanem egy folyamatnak lehet kapcsolódása több folyamathoz is, mint ahogy több folyamat kapcsolódhat egy adott folyamathoz. Az RNAV bejveteli eljárás megjelenítésénél a folyamatok kapcsolódása balról jobbra nézve időbeli kapcsolatot követ, ugyanakkor más esetekben ez nem feltétlenül van így, azaz – ahogy már korábban volt róla szó – az egyes folyamatok relatív pozíciója nem hordoz semmilyen jelentést [6, p. 7].

²⁴ Örjan Goteman, kereskedelmi pilóta, egyetemi tanár, Lund Egyetem, Svédország.

²⁵ Area Navigation (RNAV). Az RNAV egy olyan navigációs módszer, amely lehetővé teszi a légi jármű bármilyen kívánt repülési útvonalon történő üzemeltetését egy adott állomáshoz kötött (stacioner) navigációs segédeszközök lefedettségén belül, vagy önálló navigációs segédeszközök képességének határain belül, vagy ezek kombinációjával [5, p. 5].



5. ábra

Funkcionális rezonancia megjelenítése az RNAV bejövetelel eljárás esetén (a szerző [6, p. 8] alapján)

Az 5. ábra alapján látható, hogy az RNAV bejövetelel eljárás elemzése hol tárt fel funkcionális rezonanciát, azaz hogy hol mehet félre a „rendszer” normál működése (folytonos piros vonallal jelölve), illetve hol lehetnek potenciálisan olyan, esetlegesen hibás vagy nem meglévő kapcsolatok a folyamatok között, amelyeket előzetesen nem vettek számításba (szaggatott piros vonallal megjelölve).

Az 5. ábra megmutatja továbbá azt is, hogy az egyes folyamatok variabilitása mikor lép kölcsönhatásba vagy kombinálódik egymással, azaz láthatóvá válik, hogy egy adott funkciót, folyamatot esetleg helytelenül hajtanak végre, vagy akár el is hagynak. Amennyiben a nem megfelelő feltételek közül egyesek több funkcióhoz is kapcsolódnak, az a rendszer általános érzékenységre utalhat. A nagy teljesítményváltozékonyság ezért azt jelenti, hogy egyes bemenetek vagy előfeltételek kimaradnak (nem ellenőrzik megfelelően őket), és így a folyamatok között helytelen kapcsolódások fordulhatnak elő [6, p. 7].

4.7. A FRAM mint keretrendszer

Elmondása alapján Hollnagel nem azért alkotta meg a FRAM-et, hogy balesetelemzési módszer legyen [12, p. 1]. Álláspontja szerint ugyan a FRAM-et a századforduló környékén a biztonság általános értelmezésének összefüggésében fejlesztette ki, de nemcsak balesetelemzésre vagy biztonságirányításra, hanem feladatelemzésre, rendszertervezésre stb. is felhasználható. Azaz meglátása szerint a FRAM nem biztonsági eseménymodell, de nem is rendszermodell; inkább egy módszer, amely alapján egy (rendszer)modellt lehet felépíteni, és nem egy modell, amely egy módszer alapja.

Emellett a FRAM nem egy folyamatábrázolási eszköz, mivel az általa felépített modell általános grafikus ábrázolása megmutatja ugyan az elemeket (amelyek funkciókat, folyamatokat képviselnek) és a köztük lévő lehetséges kapcsolódásokat, de a cél a folyamatokban meglévő interdependenciák reprezentálása, és nem az, hogy bemutassa az elemek közötti – információ, anyag vagy energia – áramlását [2, p. 2], [12, p. 1].

5. A STAMP-modell alapjai

A FRAM-mel párhuzamosan kifejlesztett rendszerelméleti baleseti modell és folyamatok²⁶ (STAMP) egy olyan keretrendszert adnak meg, amelyet a balesetek megértésére és a (rendszer) biztonság javítására fejlesztettek ki. Az alapelméletet és a hozzá tartozó gyakorlati eljárásrendet az Egyesült Államokban, Bostonban (Cambridge), a Massachusettsi Műszaki Egyetem²⁷ kutatója, Nancy G. Leveson és kollégái alakították ki [9]. A STAMP a rendszerelmélet által meghatározott elgondolások alapján működik, a rendszer különböző elemei közötti interakciók vizsgálatával holisztikus megközelítést kínál a balesetek elemzéséhez.

A modell kidolgozására Leveson véleménye szerint elsősorban azért volt szükség, mert a korábbi eseménymodellek az ok-okozati összefüggések korlátozott vizsgálatára ösztönöznek – általában a lineáris oksági kapcsolatokat hangsúlyozzák –, és ilyen esetekben nehéz beépíteni az egyes szervezetrendszerekben meglévő nemlineáris kapcsolatokat, ideértve a visszacsatolásokat is. A bonyolult, összetett rendszerekben bekövetkezett események közelmúltbeli vizsgálata során kiderült számára, hogy a balesetek bekövetkezésének legfontosabb tényezője a vezetőség biztonság iránti elkötelezettsége és a szervezet vagy az iparág alapvető biztonsági kultúrája volt [9, p. 240]. Ennek megállapításához ugyanakkor olyan összefüggéseket is fel kellett tárni, amelyek a korábbi modellek alkalmazásával nem feltétlenül voltak egyértelműek.

Leveson szerint a hagyományos eseménymodellekben az azonosított ok-okozati tényezők a figyelembe vett eseményektől és az ezekhez az eseményekhez kapcsolódó feltételek kiválasztásától függenek. A veszteséget közvetlenül megelőző vagy abban közvetlenül érintett fizikai eseményektől eltekintve azonban az elemzés során vizsgált (rész)események kiválasztása szubjektív, az ezeket magyarázó feltételek kiválasztása pedig még inkább az. Habár a láncolat első eseményét gyakran „kezd(eményez)ő eseménynek” nevezik, ennek kiválasztása önkényes, és mindig hozzá lehet adni korábbi eseményeket és feltételeket. A visszafelé haladó eseménylánc-elemzésekben – például az eseményfa elkészítése során – a megállási pont kiválasztásának szubjektivitása azt jelenti, hogy a baleset „fő okának” kijelölése (is), az utólagos elemzéshez alkalmazott megállási szabály tekintetében tisztán pragmatikus kérdés – azaz nincs jól meghatározott „kezdet” a balesetek okozati láncának. Ennek feltételezhető oka, hogy a balesetek kivizsgálásának a korábbi időszakban többnyire két alapvető célja volt: az egyik a balesetért való felelősség megállapítása, a másik a baleset okának megértése annak érdekében, hogy a jövőbeni balesetek megelőzhetőek legyenek. Ha a cél a hibáztatás, akkor a visszafelé haladó eseménylánc visszafejtési folyamata gyakran megáll annál a pontnál,

²⁶ System-Theory Accident Model and Processes (STAMP).

²⁷ Massachusetts Institute of Technology (MIT).

ahol valakit vagy valamit felelőssé lehet tenni (hibáztatható) az esemény bekövetkezéséért. A hasonló veszteségek megelőzése szempontjából az ilyen elemzés túl felületes magyarázatot adhat arra, hogy miért is történt a baleset. A közelmúltban bekövetkezett – valamilyen módon szoftverrel kapcsolatos – repülőgép-balesetek elemzése során a legtöbb vizsgálat – többnyire – megállt a végrehajtó személy hibáztatásánál, és soha nem tért ki a baleset okának, gyökerének megállapítására – például arra, hogy az üzemeltetők miért követték el a hibákat, és hogyan lehet megelőzni ezeket a jövőben, vagy hogy miért hibás a szoftverrel kapcsolatos követelménytámasztási előírás, vagy a szoftver minőségi problémáit miért nem fedezték fel és javították ki, mielőtt alkalmazásba vették volna [9, p. 241].

A STAMP alaphipotézise, hogy a balesetek akkor következnek be, amikor a külső zavarokat, az alkatrészek meghibásodását, vagy a rendszerlemek közötti diszfunkcionális kölcsönhatásokat a szabályozó rendszer nem kezeli megfelelően, azaz a rendszer fejlesztésére, tervezésére és üzemeltetésére vonatkozó, biztonsággal kapcsolatos korlátozások nem megfelelő ellenőrzése vagy érvényesítése miatt történnek [10, p. 12].

A STAMP ugyanakkor nem elemzési módszer, hanem a balesetek bekövetkezésének módjával összefüggésben kialakított modell, illetve feltevések összessége. A STAMP-re épülő eljárások alternatívát biztosítanak a hagyományos biztonsági elemzési technikák alapjául szolgáló hibaeseménylánc-elemzéseknek (például az LCFEM²⁸ mint a hibafaelemzés, az eseményfa-elemzés) vagy a Reason-féle „svájcisajt-szeleteknek”. Ahogyan a hagyományos hibaeseménylánc-modellek esetében az elemzési módszerek a balesetek bekövetkezésének okaira vonatkozó feltételezésekre, feltevésekre épülnek, úgy a STAMP-et alapul véve új elemzési módszerek is felépíthetők. Fontos kiemelni, hogy mivel egyes hibaeseménylánc-modell lehet a STAMP eljárásrendjének egy részhalmaza, a STAMP-re épülő eszközök tartalmazhatják a régebbi biztonsági elemzési technikákból származó összes eredményt [10, p. 12].

Leveson hangsúlyozta, hogy a biztonságirányítási rendszereknek folyamatosan ellenőrizniük kell a feladatokat, és korlátozásokat kell bevezetniük a rendszer biztonságának szavatolása érdekében. A STAMP-re épülő balesetek kivizsgálásának eljárásrendje arra összpontosít, hogy a meglévő szabályozások, ellenőrzések miért nem képesek felismerni vagy megelőzni a balesethez vezető változásokat. A STAMP alapján a többszörösen összetett rendszerek vonatkozásában kidolgozták a hibák osztályozásának módszerét, amely segít az eseményhez hozzájáruló tényezők azonosításában. Emellett a STAMP felhasználása kibővíti a balesetmegelőzési akadályok és védelmi vonalak megközelítését, erősíti a proaktív gondolkodást, valamint a kiemelt biztonsági teljesítménymutatók kiválasztására is képes [13, p. 16].

A FRAM-mel ellentétben Leveson nem egy modellalkotási módszert készített, hanem a STAMP-re épülve két külön eljárásrendet dokumentált, az egyik a kockázatok azonosítására és elemzésére szolgáló rendszerelméleti folyamat elemzés²⁹ (STPA), a másik a bekövetkezett események szakmai vizsgálatára alkalmazható, a rendszerelméleten alapuló okelemzés³⁰ (CAST). A következő fejezet alapvetően a kockázatelemzési szempontból készített eljárásrendet mutatja be.

²⁸ Linear Chain of Fault Event Model (LCFEM).

²⁹ System-Theory Process Analysis (STPA).

³⁰ Causal Analysis based on System-Theory (CAST).

6. Az STPA-módszer ismertetése

Az STPA egy relatív új, proaktív veszély- és kockázatelemzési módszer, amely akár már a fejlesztés során elemzi a feltételezett balesetek lehetséges okait, hogy a veszélyek kiküszöbölhetők vagy ellenőrizhetők legyenek [10].

Az STPA néhány előnye a hagyományos veszélyforrás-, illetve kockázatelemzési technikákkal szemben a következő:

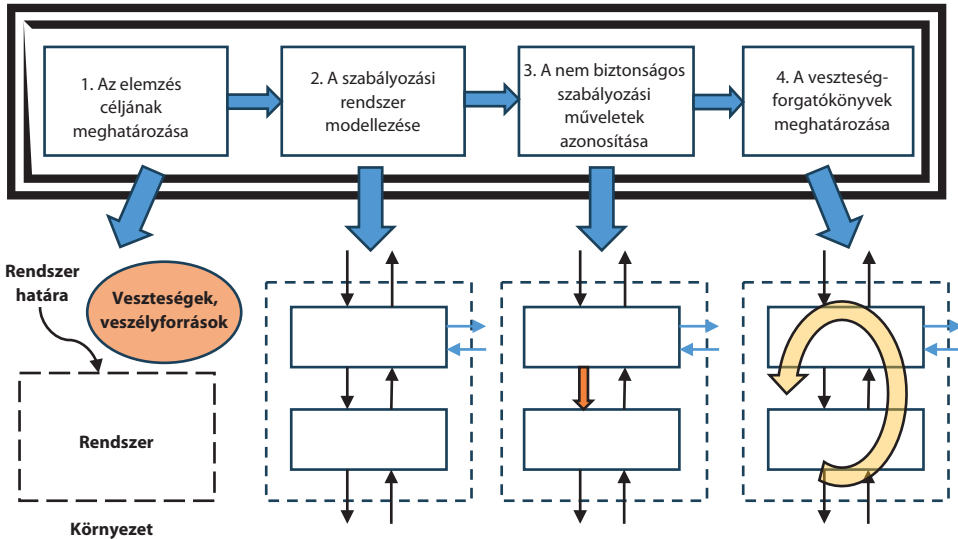
1. A STAMP alkalmazásával magas integráltsági fokú, összetett rendszerek kockázatai is elemezhetők. A korábban csak az üzemeltetés során felszínre kerülő kockázatok a fejlesztési folyamat korai szakaszában azonosíthatóvá és kiküszöbölhetővé, illetve az esetleges negatív hatásai mérsékelhetővé válnak.
2. A hagyományos veszély-, illetve kockázatelemzési módszerekkel ellentétben az STPA-t a biztonsági követelmények és korlátozások azonosításának érdekében már a korai tervezési fázisban, a koncepcióelemzés során alkalmazni lehet. Ezek eredményét ezt követően fel lehet használni a biztonsági (és a védelmi) rendszerarchitektúra kialakításába és tervezésébe történő beépítéshez, kiküszöbölve a költséges utómunkálatokat, amikor a tervezés hibáit a fejlesztés vagy az üzemeltetés során későn azonosítják. A tervezés finomításával és a részletesebb tervezési döntések meghozatalával párhuzamosan, illetve annak következményeként az STPA-elemzést is finomítják, hogy segítse az egyre részletesebb döntések meghozatalát. Az STPA alkalmazásával végrehajtott tervezés során a teljes folyamat nyomomonkövethetősége könnyen fenntartható a követelményektől az összes elkészült rendszer-alkotóelemig, ami javítja a rendszer karbantarthatóságát és fejlődését.
3. Az STPA a magas integráltsági fokú rendszerek minden elemét, a szoftvert és az emberi kezelőszemélyzetet is bevonja az elemzésbe, ezáltal szavatolja, hogy a veszély- és kockázatelemzés a veszteségek minden lehetséges okozó tényezőjére kiterjedjen.
4. Az STPA a rendszerfunkciók leírásáról dokumentációt biztosít, amely gyakran hiányzik vagy nehezen hozzáférhető a nagy, összetett rendszerekben.
5. Az STPA könnyen integrálható a rendszertervezési folyamatba és a modellalapú rendszertervezésbe [10, p. 4].

Számos értékelés és összehasonlítás készült az STPA-ról és a hagyományos³¹ kockázatelemzési módszerekről, amelyek eredményeként kimutatható volt, hogy az STPA megtalálta az összes olyan ok-okozati összefüggést, amelyet a hagyományos elemzések is feltártak, emellett számos további, gyakran szoftveres alkalmazással kapcsolatos kockázatot/veszélyforrást, illetve veszteség-forgatókönyvet is azonosított, amelyeket a hagyományos módszerek nem fedtek fel. Néhány esetben, amikor olyan baleset történt, amelynek okairól az elemzőknek nem volt információjuk, csak az STPA találta meg a baleset tényleges okát. Ezen túlmenően a többszörösen összetett, bonyolult rendszereknél az STPA idő- és forrásigény szempontjából sokkal kevésbé bizonyult költségesnek, mint a hagyományos módszerek [10, p. 4].

³¹ Például hibafa, eseményfa, HAZOP stb.

6.1. Az STPA alapeljárása

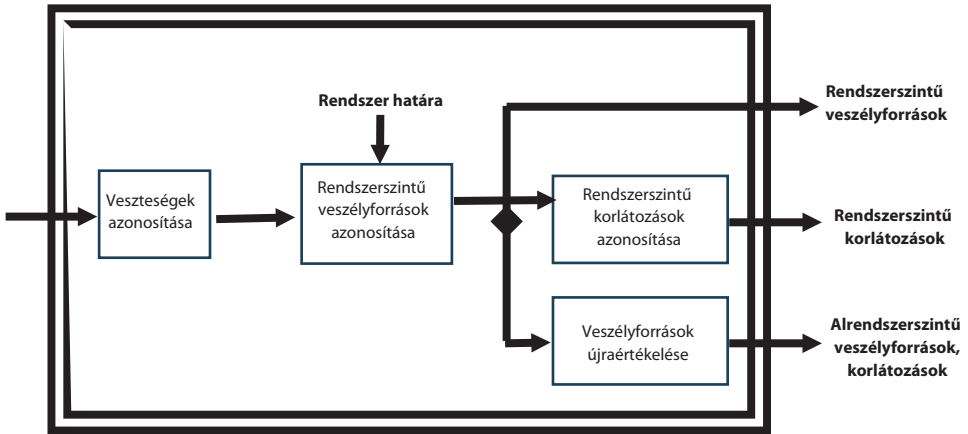
Az STPA-kézikönyv alapján az eljárás négy alapvető lépést tartalmaz, amelyet a 6. ábra szemléltet.



6. ábra
Az STPA-elemzés folyamatábrája (a szerző [10, p. 14] alapján)

6.2. Az elemzés céljának meghatározása

Itt meg kell határozni a lehetséges károkat, veszteségeket, a rendszerszintű veszélyforrásokat, a rendszer működési korlátozásait, emellett a kapott eredmények hatására adott esetben a veszélyforrásokat felül kell vizsgálni, ezáltal alacsonyabb/alrendszer szintű veszélyforrások és korlátozások kerülhetnek a felszínre (7. ábra).



7. ábra

Az elemzés céljának meghatározása az STPA első lépéseként (a szerző [10, p. 14] alapján)

A veszteségek meghatározásakor az alapelv az, hogy az érintettek számára (szervezet, személy) elfogadhatatlan veszteség tarthat ide.³² Ezeket sorra kell venni, és meg kell határozni, hogy a kockázatelemzés mely veszteségek elkerülése érdekében készül.

A rendszerszintű veszélyforrások leírásánál elsősre meg kell határozni a vizsgált rendszert, annak határait³³ és környezetét. Ha a rendszer meghatározása sikerült, akkor meg kell keresni a rendszerszintű veszélyforrásokat,³⁴ amelyek olyan rendszerállapotok vagy feltételek lehetnek (ide nem értve például az alkatrészszintű okokat vagy környezeti állapotokat), amelyek a legrosszabb környezeti feltételek esetén veszteséghez vezetnek, azaz veszélyforrásokon olyan állapotokat vagy körülményeket értünk, amelyeket meg kívánunk előzni.

A rendszer működési korlátozásai olyan rendszerfeltételeket vagy viselkedési formákat jelentenek, amelyeknek meg kell hogy feleljen a rendszer a veszélyek (és végső soron a veszteségek) megelőzése érdekében. A rendszerszintű veszélyforrások azonosítása után egyszerű behatárolni a rendszer működési korlátozásait, egyszerűen meg kell fordítani a veszélyforrások feltételeit.³⁵

³² Például az emberi élet elvesztése vagy sérülése, vagyoni kár, környezetszennyezés, küldetés ellehetetlenülése, hírnévvesztés, érzékeny információk elvesztése vagy kiszivárgása stb. [10, p. 16].

³³ A mérnöki munka szempontjából a rendszerhatár meghatározásának leghasznosabb módja, ha a rendszer vizsgálata azon részekre terjed csak ki, amelyekre a rendszer tervezőinek van ráhatásuk, kontrollt tudnak gyakorolni felette. Könnyen belátható, hogy a rendszer a környezetben felépített és a rendszer határai által elkülönülő, egymással együttműködő alrendszerekből áll, amelyek bemenete a környezetből eredeztethető, a kimenete pedig a környezet felé továbbítja a rendszer produktumát [10, p. 17].

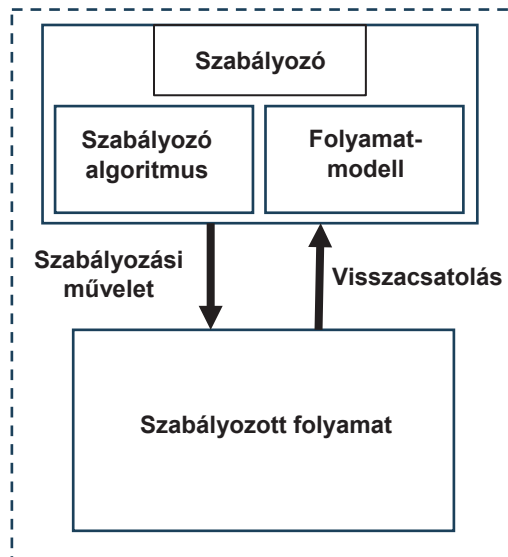
³⁴ Különbséget kell tenni a veszélyforrások és a veszteségek között: a veszteségek a környezet olyan aspektusait érinthetik, amelyek felett a rendszer tervezője vagy üzemeltetője csak részben, vagy egyáltalán nem rendelkezik ellenőrzéssel. A biztonságtechnika célja a veszélyek hatásainak kiküszöbölése vagy mérséklése az elemzett rendszerben, ezért bizonyos szintű ellenőrzésre van szükség [10, p. 17].

³⁵ Például ha légi jármű üzemeltetése során a rendszerszintű veszélyforrás a légi járművek, tereptárgyak közötti minimális elkülönítés megsértése, akkor a rendszer működési korlátja az, hogy a „rendszernek” be kell tartania a minimális elkülönítésre vonatkozó előírásokat [10, p. 20].

A veszélyforrások felülvizsgálata, az alacsonyabb szintű veszélyforrások és korlátozások meghatározása ugyan nem szükséges az STPA alkalmazásához, de ettől függetlenül hasznos kiegészítői lehetnek az összetett rendszerek elemzésének, mivel irányt mutathatnak a későbbi lépések, mint például a szabályozási rendszer modellezése esetén. Ehhez azonosítani kell azon alapvető folyamatokat vagy tevékenységeket a részrendszerben, amelyeket a rendszerszintű veszélyforrások, illetve kockázatok megelőzése érdekében ellenőrizni kell [10, pp. 14–22].

6.3. A szabályozási rendszer modellezése

A hierarchikus szabályozási rendszer egy olyan rendszermodell, amely irányítási folyamatokból és visszacsatolásokból (vezérlőhurkokból) áll, és amely a teljes rendszer működésére és viselkedésére nézve strukturális szabályozásokat érvényesít. Általában a szabályozó (vezető) döntéseket hoz a célok elérése érdekében, és szabályozási műveleteket hajt végre bizonyos folyamatok irányítása/vezérlése és a szabályozott folyamat viselkedésére vonatkozó korlátozások érvényesítése érdekében.



8. ábra

Általános szabályozási rendszer (hurok) (a szerző [10, p. 23] alapján)

A 8. ábrán látható, hogy a szabályozott folyamat egy fizikai folyamat vagy egy másik szabályozó irányítása lehet. A szabályozó algoritmus a vezető döntéshozatali folyamatát jeleníti meg – ez határozza meg a végrehajtandó szabályozási műveleteket.

A szabályozó önmagában is rendelkezik folyamatmodellekkel, amelyek belső döntéshozatali eljárásrendjét jelenítik meg. Ezen folyamatmodellek emellett tartalmazhatják a szabályozó elgondolását, képét az általa irányított folyamatról, a rendszer vagy a környezet egyéb releváns aspektusairól. A szabályozó a szabályozási műveletek kiadásával befolyásolja a szabályozott

folyamatot. A szabályozó a folyamatmodelleket részben az irányított folyamat megfigyeléséhez használt visszajelzések (*visszacatolás*) alapján felülvizsgálhatja, módosíthatja.

Problémák a szabályozási rendszer bármely pontján keletkezhetnek.³⁶ A valóságban megjelenő hierarchizált rendszerekben megtalálhatók a fenti elemek, azaz a szabályozó, a szabályozási műveletek, a visszacsatolás, az irányított folyamat, illetve ezt kiegészítik még egyéb, a rendszer elemeitől érkező *bemeneti* vagy azok felé távozó *kimeneti jelek, folyamatok*.

A modellkészítés lépéseinek megkezdéséhez minimálisan legalább egy szabályozó, egy szabályozási művelet és egy szabályozott folyamat szükséges. Az elemzés kezdődhet egy hiányos struktúrával is, ilyenkor az STPA segít azonosítani az esetlegesen hiányzó visszajelzéseket, ellenőrzéseket és egyéb hiányosságokat, így a szabályozási struktúra a fejlesztéssel párhuzamosan finomítható. Adott rendszer szabályozói rendszerének modellezése során a 8. ábra szerinti alapmodell kibontását kell végrehajtani, figyelemmel arra, hogy minden rendszer más és más tulajdonságokkal, valamint alrendszerekkel rendelkezik. Az STPA végrehajtása során ezt olyan körfolyamatként kell kezelni, amely minden egyes ciklusban új felelősségi körök felbukkanása során további részleteket ad a modellhez. Általánosságban elmondható azonban, hogy az STPA elvégzése könnyebb és hatékonyabb lesz, ha a releváns információk szándékosan nem hiányoznak a vezetési struktúrából [10, pp. 22–34].

6.4. A nem biztonságos szabályozási műveletek azonosítása

A nem biztonságos szabályozási művelet³⁷ (UCA) definíció szerint olyan tevékenység, amely adott körülmények között (a legrosszabb esetben, a legrosszabb környezeti körülmények fennállása esetén) annak végrehajtása vagy a végrehajtás elmaradása esetén a rendszerben veszélyforrás megjelenéséhez vagy veszélyhelyzet kialakulásához vezet. Emellett UCA-nak tekinthetők azon műveletek is, amelyek noha *potenciálisan biztonságosak*, de egy folyamat vezérlése során *túl korán, túl későn vagy rossz sorrendben* hajtják őket végre, vagy adott esetben *túl sokáig tartanak, vagy túl korán befejeződnek*.

Minden UCA esetében meg kell határozni, hogy az adott szabályozási művelet milyen feltételek mellett (milyen kontextusban) nem biztonságos. Ezután ezeket az eseteket ki lehet zárni a rendszertervezésből, vagy meg lehet találni az esetleges kármérséklés módját. Egy UCA esetében bármilyen releváns kontextust meg lehet hivatkozni, beleértve a környezeti feltételeket, a szabályozott folyamat állapotát, a szabályozó állapotát, a szabályozó korábbi műveleteit (például ismétlődő műveletek), más szabályozók állapotát és korábbi műveleteit, egyidejű vagy ellentétes műveleteket, a szabályozási művelet paramétereit vagy tulajdonságait, vagy bármely más releváns feltételt.

Az UCA-k meghatározásakor fontos kiemelni, hogy az STPA-t ideális esetben még azelőtt célszerű alkalmazni, hogy bizonyos folyamatvédő automatizmusok ismertek lennének és beépülnének a tervezés alatt álló rendszerekbe. Az STPA egyik feladata ugyanis az, hogy

³⁶ Ha a szabályozott folyamat nem konzisztens a valósággal, az olyan szabályozási műveletekhez vezethet, amelyek veszélybe sodorhatják a rendszer működését. Ha például a visszacsatoló szenzor nem megfelelően működik egy rendszerben, az nem biztonságos rendszerműködéshez vezethet [10, p. 23].

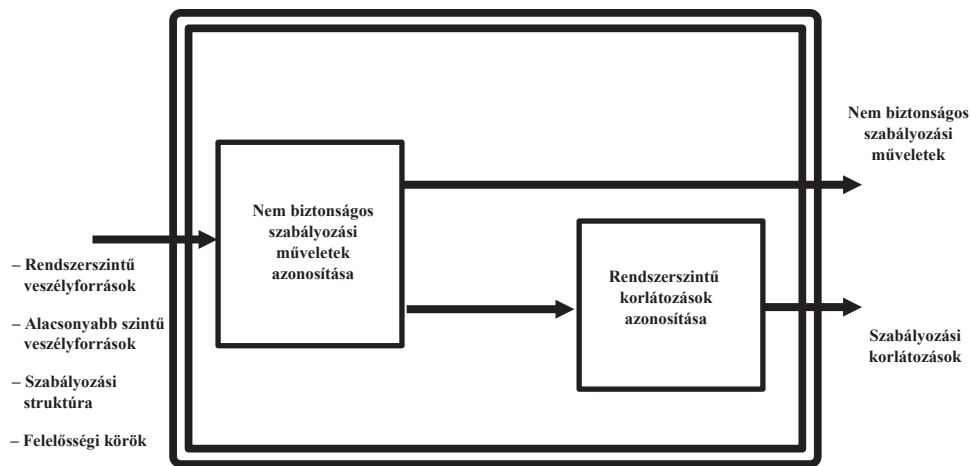
³⁷ Unsafe Control Action (UCA).

azonosítsa azokat az UCA-kat, amelyeket meg kell előzni, illetve ezt követően az UCA-kat felhasználva meghozza a funkcionális követelmények levezetéséhez szükséges és az UCA-k megelőzésére vagy mérséklésére irányuló tervezési döntéseket. A potenciális nem biztonságos rendszerviselkedés azonosítása után létre lehet hozni a konkrét tervezési jellemzőket, és hozzá lehet adni a folyamatvédő automatizmusokat, biztosító rendszereket (ha a terv még nem létezik), vagy meg lehet határozni a meglévő tervezési döntések és biztosító rendszerek megfelelőségét (ha a terv már létezik).

Minden UCA a rendszerszintű hatásain és eredményein keresztül a veszélyforrásokra vagy alacsonyabb szintű veszélyforrásokra mutat rá. Sok rendszer esetében az UCA és a veszélyforrások közötti kapcsolat egyértelmű és nyilvánvaló, néhány esetben azonban összetettebb, vagy éppen nem egyértelmű.

Az UCA-k vizsgálatába be kell vonni az ember által elkövetett vagy elkövethető nem biztonságos tevékenységeket (hibákat) is. Az STPA elmélete szerint az emberi tevékenységet ugyanúgy a rendszer részének kell tekinteni, amely így könnyen integrálhatóvá válik az elemzés elkészítésének folyamatában.

Az UCA-k összesítése végén meg kell határozni a *szabályozói korlátozásokat*, amelyek azon szabályozói viselkedések összességét jelentik, amelyeknek a szabályozást végző folyamat meg kell hogy feleljen az UCA-k megelőzése érdekében (9. ábra) [10, pp. 34–42].

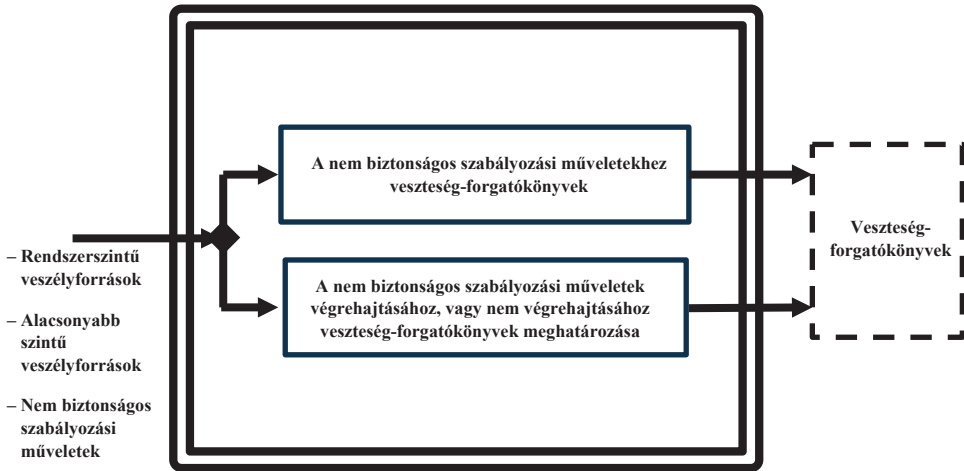


9. ábra

A szabályozási műveletek vizsgálatának áttekintése (a szerző [10, p. 42] alapján)

6.5. A veszteség-forgatókönyvek meghatározása

A veszteség-forgatókönyv leírja azokat az ok-okozati tényezőket, amelyek UCA-k és veszélyhelyzetek kialakulásához vezethetnek.



10. ábra

A veszteség-forgatókönyvek meghatározásának folyamata (a szerző [10, p. 52] alapján)

A 10. ábrán látható, hogy az STPA záró alaplépésénél a rendszerszintű veszélyforrásokból, az esetlegesen feltárt alrendszer szintű veszélyforrásokból, a szabályozási struktúra tulajdonságaiból, illetve az UCA-k hatásaiból meg kell határozni azokat az ok-okozati összefüggéseket, amelyek az UCA-k kialakulásához, illetve a szabályozási műveletek nem megfelelő végrehajtásához, vagy éppen végre nem hajtásához vezetnek [10, pp. 42–53]. Ezen folyamatok elemzéséből levezethetők azon biztonsági követelmények vagy kockázatcsökkentő intézkedések, eljárások, amelyek az összetett rendszer biztonságosabb üzemeltetését hivatottak biztosítani.

6.6. Az STPA eredménye és visszakövethetősége

Az STPA feltárja egy vizsgált rendszer UCA-k alkalmazásával meglévő veszélyforgatókönyveit, a szabályozási korlátozásokat és ezek együttes hatását az UCA-k kialakulására. Emellett megmutatja a felelősségi körök kiosztásának hatását a rendszerszintű korlátozásokra. Összefoglalja a fentiek összesített befolyását a rendszerszintű veszélyforrásokra, amelyekre szintén hatnak az UCA-k alkalmazása nélküli veszteség-forgatókönyvek. Végül megmutatja a rendszer lehetséges veszteségeit.

Az STPA kimenetén megjelenő eredmények felhasználhatók, többek között egy rendszer-architektúra szabályozására, megfelelő rendszerkövetelmények létrehozására, tervezési ajánlás megfogalmazására, a szükséges kockázatcsökkentő eljárások és védelmi tevékenységek azonosítására. Emellett segítenek a megfelelő tesztelési pontok meghatározásában és a tesztervek elkészítésében, az új tervezési döntések meghozatalában.³⁸ Az eredmények felhasználhatók továbbá a meglévő tervezési döntések értékeléséhez, valamint a hiányosságok

³⁸ Amennyiben a fejlesztés során STPA alkalmazása mellett döntöttek a tervezők.

és a szükséges változtatások azonosításához.³⁹ Nem utolsósorban az eredmények elősegítik a kockázatkezelés során alkalmazott kiemelt biztonsági mutatók meghatározását és a hatékonyabb biztonságirányítási rendszerek kialakítását [10, p. 52].

6.7. A STAMP és az STPA további alkalmazása a biztonsági mutatók meghatározásában a kockázatok kezelése során

Minden biztonságos működés megvalósítását célzó rendszernek, így a repülésbiztonság-irányítási rendszernek is egyik alapeleme a fellépő kockázatok kezelése. A kockázatok kezelési rendszere (kockázatmenedzsment) nehezen elképzelhető olyan indikátorok alkalmazása nélkül, amelyek az adott rendszer működéséről összegyűjtött információk közül kiemelten fontos tulajdonságokkal bírnak, ezáltal képesek jelezni az adott rendszer biztonságos működésében bekövetkezett negatív változásokat.

Ezek a mutatók a légi közlekedésben többnyire a kockázatok valószínűsége szerint vannak meghatározva.⁴⁰ Ugyanakkor a STAMP modellen alapuló STPA-eljáráshoz kötötten – Leveson elmélete szerint – a hasznosnak tekinthető *kiemelt (biztonsági) mutatókat*⁴¹ a mérnöki gyakorlati *tapasztalatok* és a vizsgált rendszerek sebezhetőségének alapjául szolgáló, kritikusként tekintett *felvetések* mentén lehet azonosítani, nem pedig a káresemények valószínűsége alapján [11, p. 20].

A biztonságot érintő kritikusként tekintett *felvetéseket* a STAMP-modell segítségével az alábbiak mentén szükséges csoportosítani:

1. a rendszer veszélyeiről és a veszélyekhez vezető okokról kialakított felvetés;⁴²
2. azok a felvetések, amelyek a veszélyek csökkentésére vagy kezelésére alkalmazott szabályozási műveletek hatékonyságára vonatkoznak;
3. a rendszer üzemeltetésének módjára és a környezetre (kontextusra) vonatkozó felvetések, amelyben a rendszer működni fog;⁴³
4. a fejlesztési környezetre és folyamatokra vonatkozó felvetések;
5. az üzemeltetés során a szervezeti és társadalmi biztonságsszabályozási struktúráról kialakított felvetések.⁴⁴

³⁹ Amennyiben a tervezés befejezése után továbbra is az STPA-eljárást alkalmazzák a tervezők.

⁴⁰ Példaként a Boeing gyár a B-787-es repülőgépek esetében azt feltételezte a lítiumion-akkumulátorok meghibásodása kockázatának becslésekor, hogy a valószínűség 1 eset a 10 000 repült órára lebontva, de a tényleges esemény kétszer fordult elő az első 52 000 repült óra alatt [11, p. 19].

⁴¹ Leveson a kiemelt mutatókon olyan figyelmeztető jeleket ért, amelyek egy biztonságkritikus folyamat felügyelete során használhatók annak észlelésére, ha egy biztonsággal kapcsolatos feltételezés megszűnik vagy veszélyesen gyengévé válik, és a baleset megelőzése érdekében intézkedésre van szükség [11, p. 20].

⁴² Új veszélyek merülhetnek fel, vagy a meglévő veszélyek ok-okozati elemzésének alapjául szolgáló feltételezések, felvetések változhatnak [11, pp. 24–25].

⁴³ Feltételezzük, hogy egy rendszer vezérlése a tervezők által meghatározott módon fog történni. Ugyanakkor az emberi viselkedésre vonatkozó felvetések különösen sérülékenyek, mivel az emberek idővel hajlamosak alkalmazkodni a működési környezethez vagy a gyakorlatban alkalmazott eljárásrendektől való „praktikus” eltéréshez [11, p. 24–25].

⁴⁴ Azaz hogy minden a terveknek megfelelően működik, a tervezés megfelelő volt a rendszer biztonsági követelményeinek érvényesítéséhez, illetve a rendszerirányítók teljesítik biztonsági feladataikat, és a terveknek megfelelően működnek. Ilyen feltételezések közé tartoznak a biztonsági kultúra állapotára vonatkozó feltételezések, például hogy a szervezeti biztonsági irányelveket követi-e, vagy sem [11, p. 25].

A kockázatértékelésben a sebezhetőségre vagy a kockázat súlyosságára vonatkozó felvetések.⁴⁵ [11, pp. 24–25].

A megfelelő és hatékony kiemelt mutatók – legalábbis részben – az STPA segítségével azonosíthatók, oly módon, hogy a fentebb említett hierarchikus szabályozási struktúra modelljét és a szervezetbe épített ellenőrzéseket felhasználva azonosítjuk azokat a felvetéseket, amelyeken a FRAM-módszer esetében is említett „felbukkanó” (biztonsági) rendszertulajdonságokra vonatkozó korlátozások alapulnak, és meghatározzuk, hogyan lehet észlelni a rendszer céljainak elérésére tervezett ellenőrzések hatékonyságának gyengülését [10, p. 101].

Az STPA négy alaplépésén keresztül a biztonságkritikus felvetések meghatározhatók a kapcsolódó biztonsági célok, a működéshez szükséges szabályozási rendszerrel kapcsolatos összefüggések vizsgálatával, és feltárhatók a felmerülő UCA-kkal való kapcsolódási pontok is.

A biztonságkritikus felvetések egyik alapvető csoportja szerint egy megfelelően megtervezett és üzemeltetett rendszerben nem fordulnak elő veszélyforrások és kockázatok. Ugyanakkor bármely veszélyforrás megjelenése vagy esemény bekövetkezése (még akkor is, ha nem vezet balesethez) a biztonsági folyamatok teljes felülvizsgálatát kell hogy kiváltsa. A veszélyforrások azonosítása kiindulópontként szolgálhat, amelyből az STPA használatával a veszélyforrásokhoz vezető (veszteség-)foratókönyvek azonosítására további ellenőrzések vezethetők le [10, p. 109]. A kiemelt indikátorok ezen veszélyforrások előrejelzésére szolgálnak.

7. Összegzés

A technológiai fejlődés folyamatos gyorsulásának eredményeként a légi járművek fejlesztése egyre komplexebb rendszereket hoz létre, amelyek már nemcsak mechanikai tulajdonságaik szerint lesznek egyre bonyolultabbak, hanem az alkalmazott és azokat működtető szoftverek integráltsági fokát tekintve is mind nagyobb kihívásokat jelentenek. A lineáris kockázatelemzési eljárások napjainkra elérték a működési korlátjaikat, azaz ezen rendszerek részletes analízise csak bizonyos mértékű egyszerűsítés mellett végezhető el.

A jelen cikkben bemutatott – kifejezetten ilyen többszörösen összetett, integrált rendszerek vizsgálatára kialakított – modellek lehetőséget biztosítanak ezen bonyolult rendszerek tervezésének támogatására, a működésük megértésére, a felmerülő veszélyforrások és kockázatok azonosítására.

A FRAM- és a STAMP/STPA-módszerek ugyanazon problémára két különböző megközelítési módot képviselnek. Céljuk a bonyolult, többszörösen összetett, magas integráltsági fokú rendszerek olyan modellezése, amely alkalmas a működésükben rejlő veszélyforrások, kockázatok és a lehetséges veszteségek azonosítására, elemzésére.

Ugyanakkor kár lenne tagadni, hogy akár a FRAM-, akár a STAMP-módszerre épülő STPA-eljárás megértése, alkalmazása nem egyszerű feladat. A FRAM esetében online esettanulmányok is elérhetők a módszer alapjainak jobb elsajátítása érdekében, illetve külön számítógéppel támogatott vizualizációs alkalmazás kifejlesztésére is sor került az elmúlt időszakban. A fejlesztők honlapján FRAMily néven kisebb közösséget építenek a FRAM-felhasználók között, illetve rendszeres konferenciák népszerűsítik a módszert.

⁴⁵ Ezek idővel változhatnak, és így magának a kockázatkezelési és a kiemelt indikátorok rendszerének újratervezését teszik szükségessé [11, p. 25].

Mindkét eljáráshoz külön kézikönyvet adtak ki, amelyek példákkal illusztrálva igyekeznek „emészhetőbb” formába önteni az elemzési folyamatokat. A FRAM mellett a STAMP módszer is rendelkezik internetes támogatással STAMP Workshop néven, itt az MIT szerverén elérhető az eddig kiadott dokumentációk, képzési és alkalmazási segédletek.

Az eddigi ismeretek szerint a STAMP modell alkalmazása egyelőre kevésbé terjedt el a biztonság foglalkozó szakmai közösségben, és nem ismerik annyira széles körben, mint a lineáris vagy komplex lineáris eseménymodelleket, emiatt jelenleg vélhetően kisebb hatást gyakorol a balesetek modellezésére, illetve általában a biztonságirányítási rendszerekre. Ennek egyik oka lehet a modell komplexitása, a másik pedig az, hogy nem alkalmazza a széles körben használatos adatgyűjtési és adatelemzési eljárásokat, hiszen dedikáltan más célokat foglalmaztak meg a fejlesztők [13, pp. 16–17].

A University of Southern California, Viterby, Schools of Engineering, Aviation Safety and Security Program oktatójával – aki egyben az American Airlines repülésbiztonsági vezetője is⁴⁶ – 2024 szeptemberében folytatott informális megbeszélés során elhangzott, hogy az American Airlines légitársaságnál bizonyos balesetek, illetve működési kockázatok feltárásakor tapasztaltak alapján a STAMP egy kiváló rendszerelméleti eljárásrend, amelynek alkalmazása magas fokú hozzáértést és képzettséget feltételez, az elemzés elvégzése a vizsgált folyamat, rendszer bonyolultsági fokától függően meglehetősen időigényes feladat.

Ebből kifolyólag a STAMP elemzési folyamat előnye mindenképpen a komplex, integrált rendszerek elemzési lehetőségében áll, ugyanakkor a profitorientált világban – ahol a műveletek végrehajtási kényszere, az időhiány, a bekerülési költségek és a haszon közötti köztöltő folyamatos nyomás alá helyezi a rendszerbiztonsággal foglalkozó szakembereket – az elemzési módszer viszonylagos bonyolultsága kihívásokat állít a módszer elterjedése elé.

Összességében a két bemutatott módszer, habár különböző megközelítés mentén, egy fontos paradigmaváltást készíthet elő a (légi közlekedési) balesetek, események modellezésében, valamint a kockázatelemzések elkészítésében.

Felhasznált irodalom

- [1] D. Viner, *Accident Analysis and Risk Control*, Melbourne, Derek Viner Pty Ltd, 1991.
- [2] E. Hollnagel, D. Slater, *A FRAM Handbook*, FRAMsynt 2022.
- [3] E. Hollnagel, *An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Assessment of Organisational Change*, Stockholm, Swedish Radiation Safety Authority, 2013. Online: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/057/44057156.pdf
- [4] E. Hollnagel, *Barriers and Accident Prevention*, London, Ashgate Publishing, 2004.
- [5] E. Hollnagel, *FRAM Model Interpreter*, FRAMsynt 2021. Online: https://safetysynthesis.com/onewebmedia/FMI_Plus_V2-1.pdf
- [6] E. Hollnagel, Ö. Goteman, "The Functional Resonance Accident Model," in *Cognitive Systems Engineering in Process Control*, Sendai, Tohoku University 2004. Online: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/403.pdf>

⁴⁶ John de Leeuw, Managing Director Safety and Efficiency, American Airlines.

- [7] J. Rasmussen, „Human Error and the Problem of Causality in Analysis of Accidents.” *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, 327. évf. 1241. sz. pp. 449–462. 1990. Online: <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0088>
- [8] J. Larouzee, J.-C. Le Coze, „Good and Bad Reasons: The Swiss Cheese Model and Its Critics,” *Safety Science*, 126. évf. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104660>
- [9] N. Leveson, „A New Accident Model for Engineering Safer Systems,” *Safety Science*, 42. évf. 4. sz. pp. 237–270. 2004. Online: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X)
- [10] N. G. Leveson, J. P. Thomas, *STPA Handbook*, MIT Partnership for System Sproaches to Safety and Security (PSASS), Boston, Massachusetts Institute of Technology, 2018. Online: https://psas.scripts.mit.edu/home/get_file.php?name=STPA_handbook.pdf
- [11] N. G. Leveson, „A Systems Approach to Risk Management Through Leading Safety Indicators,” *Reliability Engineering and System Safety*, 136. évf. pp. 17–34. 2015. Online: <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.10.008>
- [12] R. Patriarca et al., „Framing the FRAM: A Literature Review on the Functional Resonance Analysis Method,” *Safety Science*, 129. évf. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104827>
- [13] Y. Toft et al., *Model of Causation: Safety*, Tullamarine, Safety Institute of Australia Ltd. 2012.

The Evolution of Risk Analysis in Aviation Safety II

As many hazardous operations, aviation can only be carried out on the basis of acceptable and unacceptable risks, i.e. risks that must be managed. The purpose of writing this article is to continue the presentation, possible interrelationship and usefulness of risk analysis procedures that have emerged since the 1960s. It is intended to describe risk analysis and visualisation procedures that can be applied to the analysis of complex, multi-integrated systems in addition to linear risk analysis procedures. However, understanding and applying the models that emerged after the 2000s is as complex a task as the systems they are designed to analyse. This article aims, among other things, to help in understanding this complex vision. The research method chosen was based mainly on a review of the foreign literature.

Keywords: *risk assessment, risk management, linear event model, komplex non-linear event modell, FRAM, STAMP, STPA*

Beller Balázs
 vezető kiemelt főtiszt
 HM Állami Légügyi Főosztály
 Repülésbiztonsági és Repülőtérfelügyeleti
 Osztály
balub77@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6117-1026

Balázs Beller
 Senior Executive Staff Officer
 MoD State Aviation Department
 Flight Safety and Airport Operations
 Supervisory Division
balub77@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6117-1026

Füstös Julianna, Vas Tímea, Károly Krisztián

Légi forgalmi irányítók képzésének és kiválasztásának perspektivikus lehetőségei XR-alapokon humánteljesítmény-diagnosztikai támogatással

A légi forgalom növekedése fokozott terhelést ró a légi forgalmi irányítókra, miközben egyre több emberre lenne szükség. A hagyományos képzési módszerek nem mindig alkalmasak a jelöltek bevalásának és képzési előmenetelének objektív mérésére, feltételezésünk szerint a bevalás egyik kulcsa az egyén teljesítőképessége fokozott igénybevétel mellett. Kutatásunkban XR-alapú szimulációval és humánteljesítmény-diagnosztikai mérésekkel vizsgáltuk többek között a stressz és a teljesítmény összefüggéseit. Az eredmények ígéretesek, de a módszer szélesebb körű bevezetéséhez további, nagyobb mintán végzett vizsgálatokra van szükség.

Kulcsszavak: légi forgalom, XR, virtuális valóság, képzés, kiválasztás, teljesítménydiagnosztika, stressz

1. Bevezetés

1.1. A légi forgalom növekedése

Az utóbbi években a légi forgalom jelentős növekedést mutatott. A 2000-es évek közepétől folyamatosan emelkedett, majd a Covid-19-járvány kitörésekor drámai visszaesést mutatott, ami globális szinten hosszú távú hatásokat gyakorolt a légi közlekedésre. A helyreállítás körülbelül két-három évet vett igénybe, és ennek eredményeként a forgalom fokozatosan visszatért a normális működéshez. A járvány utáni években azonban meg is haladta a 2019-es szintet, és az iparág új növekedési pályára lépett. Magyarországon 2024-ben a légi forgalom 6%-kal, míg nemzetközi szinten 10,4%-kal nőtt 2023-hoz képest, és az elkövetkező években is mérsékelt, de folyamatos növekedés várható a globális légi közlekedésben [1]. Mindemellett a 2022 februárjában kezdődő orosz-ukrán konfliktus okozta légtérzár az Európán keresztülhaladó légi forgalmat jelentősen átrendezte, ami a magyar légtérben jelentős forgalomnövekedést okozott [2].

Ezzel párhuzamosan a légi forgalmi irányítók munkája is drámaian megugrott, hiszen a növekvő forgalom nemcsak a járatok számát emelte, hanem a koordinálásukhoz szükséges beavatkozások számát is. Az irányítóknak folyamatosan biztosítaniuk kell, hogy minden járat biztonságosan és hatékonyan közlekedjen a légtérben, ami folyamatos koncentrációt és gyors döntéshozatalt igényel. Ez a megnövekedett munkaterhelés rendkívüli kihívások elé állítja

őket, különösen akkor, amikor a forgalom egyes területeken jelentősen sűrűsödik, ez pedig hatalmas stresszfaktor, és hosszú távon veszélyezteti a biztonságot.

Mindez azt eredményezi, hogy a légi forgalmi irányítók munkája egyre nagyobb mentális terheléssel jár. A fokozott koncentráció, a gyors döntéshozatal szükségessége, valamint az új típusú járművekkel való koordináció komoly kihívások elé állítja az irányítókat.

1.2. A légi forgalmi irányítók kiválasztásának kihívásai

A hosszú és nehéz képzés, a rendkívüli stressz, a túlterheltség és a meglehetősen speciális munkaerőpiaci kereslet mind arra mutat, hogy csak kevesen alkalmasak légi forgalmi irányítói munkakör betöltésére. A légi forgalmi irányítók száma nem az elvárt mértékben növekszik, és az ebből fakadó létszámihiány, illetve a megnövekedett munkaterhelés hátrányosan befolyásolhatja a repülés biztonságát. Ha a megfelelő számú és jól képzett irányító nem áll rendelkezésre, az késésekhez, szélsőséges esetben akár balesetekhez is vezethet.

A légi forgalmi irányítóvá válás azonban egy hosszú és összetett folyamat, amely több szakaszból áll. A jelentkezőknek pszichológiai és kognitív teszteken kell átesniük, amelyek a memóriát, a figyelmet, a döntéshozatali képességet és a stressztűrést mérik.

A legelterjedtebb ilyen teszt (amelyet a HungaroControl¹ is alkalmaz) a FEAST² teszt. Ez egy olyan feladatsor, amely során a jelentkezők kognitív képességeit (észlelés, információfeldolgozás, memória, döntéshozatal, angol nyelvtudás) és a munkakör ellátásához szükséges személyiségjegyeket mérik és vizsgálják. Az EuroControl³ kifejezetten a jelöltek kiválasztására fejlesztette ki ezt a tesztet, azonban a képzés nagyon szigorú, és a jelentkezők nagy része az első évben kiesik. Ennek az egyik oka lehet, hogy a hagyományos kiválasztási módszerek nem mindig tudják pontosan előre jelezni, hogy egy jelölt valóban alkalmas lesz-e a munkára, illetve ezen alkalmassági tesztek elsődleges célja az egyértelmű alkalmatlanság megállapítása.

A Magyar Honvédség számára a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Karán (továbbiakban: NKE HHK) a Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék keretében zajlik a katonai légi forgalmi irányítók képzése. A képzésre történő jelentkezéshez a hallgatóknak meg kell felelniük bizonyos feltételeknek: egészségügyi, pszichikai és fizikai alkalmassági vizsgálatokon kell jól teljesíteni az előzetes középfokú tanulmányi eredményeken túl. A jelöltek alkalmassági kiválasztását a Repülőorvosi Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézet végzi, ennek az előszűrésnek is az egyértelmű alkalmatlanság megállapítása a célja.

A pszichológiai alkalmassági vizsgálatok is gyakran támaszkodnak önbevallásos tesztekre és szubjektív értékelésekre, ami nem mindig ad teljes képet egy adott jelölt valós teljesítőképességéről. Ezért megfogalmazódott az igény újabb módszerek bevonására, amelyek pontosabban és objektívebben tudják mérni a jelöltek alkalmasságát.

¹ A magyar légtérben légi forgalmi szolgáltatásokat nyújtó állami tulajdonú vállalat.

² First European Air Traffic Controller Selection Test.

³ Európa légi közlekedésének biztonságáért felelős szervezet.

1.3. A képzés fejlesztésének szükségessége

Ha valaki bekerül a légi forgalmi irányítói képzésbe, akkor több szakaszon kell végigmennie ahhoz, hogy légi forgalmi irányítónak válhasson. Ezek közé tartozik az elméleti oktatás, a szimulátoros gyakorlás és a valós forgalomban történő betanulás. Ez így összesen két évet vesz igénybe, ami nemcsak költséges, hanem időigényes is.

A hagyományos szimulátorok ugyan jól modellezik a munkakörnyezetet, de nem tudják visszaadni teljesen a valóság érzetét, valamint nincsenek felszerelve olyan humánteljesítmény-diagnosztikai szenzorokkal, amelyek képesek megfelelően mérni a munkaterheléssel jelentkező stresszértékeket.

Az NKE HHK légi forgalmi irányító képzése négy évig tart, amely során a repülésirányító mellett honvédtiszti felkészítés is zajlik. Az elméleti oktatáson túlmenően gyakorlati szimulációs körülmények között végezhető képzést is kapnak a hallgatók. Ugyanakkor az egyéni kompetenciák és a képzésben való előrehaladás mérése és dokumentálása nem megfelelően biztosított. Nagyobb hangsúlyt kellene kapnia az egyéni fejlődés többoldalú nyomon követésének.

Összességében tehát nemcsak több irányítóra van szükség, hanem hatékonyabb és gyorsabb képzési módszerekre is. Ebben segíthet részben az XR,⁴ vagyis a kibővített valóság technológia, amely egyre nagyobb szerepet kap a szakmai képzésekben (akár orvosi területen – sebészeknél, mérnöki területen stb.), ennek megfelelően a légi forgalmi irányítás területén is komoly lehetőségekkel bír [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

1.4. Az XR-technológia szerepe a képzésben

Az XR egy gyűjtőfogalom, amely magában foglalja a virtuális (VR⁵), a kiterjesztett (AR⁶) és a kevert (MR⁷) valóságokat. Ezek mind immerzív⁸ technológiák, amelyek a hagyományos szimulátorokhoz képest részletgazdagabb és dinamikusabb környezetet kínálnak azáltal, hogy a felhasználó szemszögéből mutatják be az adott folyamatot, elősegítve a felhasználók teljes elmerülését a digitális munkakörnyezetben. Ennek eredményeként a tanulási folyamat hatékonyabbá és gyorsabbá válik a hagyományos módszerekhez képest.

A VR- és AR-alapú tréningek úgy vannak kialakítva, hogy egyszerre több tanuló is részt vehet ugyanabban a gyakorlatban, gyakran akár különböző helyszínekről is. Ez előnyt jelent a hagyományos szimulátorokkal szemben, mivel nincs szükség minden hallgató számára külön fizikai eszközre vagy szimulátorfülkére – egy VR-headset elegendő lehet. Emellett kevesebb oktató is elegendő, hiszen az XR-szimulációk gyakran tartalmaznak automatikus visszajelzési és értékelő funkciókat.

⁴ Extended Reality, kibővített valóság.

⁵ Virtual Reality, virtuális valóság.

⁶ Augmented Reality, kiterjesztett valóság.

⁷ Mixed Reality, kevert valóság.

⁸ Bevonó, magával ragadó.

2. A kutatás

2.1. Cél és alapkoncepció

A kutatásunk célja egyrészt az volt, hogy felfedezzük-megvizsgáljuk, mennyire hasonlít egy virtuális valóságban megjelenő légi helyzet kezelése azokra a kompetenciákra, amelyeket szeretnénk, ha a hallgatók a képzés során elsajátítanának. Másrészt ezek a szimulációk milyen élettani, elsősorban stressz-, illetve HRV⁹-értékeket produkálnak. Azt vizsgáltuk, hogy a szimulált környezet növeli-e a stressz-szintet, és ha igen, mennyire, valamint hogy a stresszérték és a HRV-érték milyen összefüggésbe hozható a nehezebb szituációkkal.

A mentális terhelésre és a fizikai reakciókra voltunk kíváncsiak, hogy objektív, tényszerű adatok alapján elemezhesük az XR-technológia, valamint a légi forgalmi helyzet megoldásának hatásait. Ezzel kapcsolatban az egyik legfontosabb kérdés az volt, hogy mennyire terhelik meg az irányítók/irányítójelöltek szervezetét és idegrendszerét az XR-alapú (légi forgalmi) szituációk.

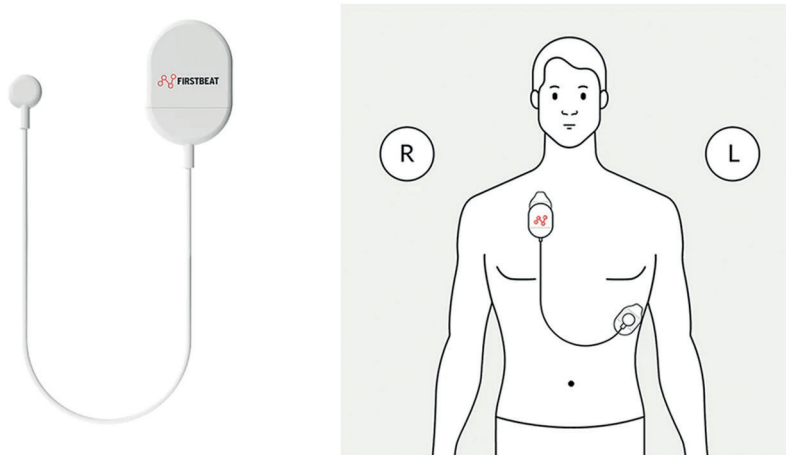
A figyelemre és a kognitív terhelésre adott hatásokkal azt akartuk megfigyelni, hogy vajon hozzá lehet-e szokni a VR-munkakörnyezethez, illetve a szimulációs feladatok megoldásához. Szükséges kiemelni, hogy a szimuláció során egy teljesen új perspektívából nézzük a légi forgalmi helyzetet. Az alkalmazott 2D-s radarkép helyett egy 3D-s madártávlati nézetből kellett a tesztalanyoknak megoldania a kialakuló konfliktusokat. Kíváncsiak voltunk arra, hogy az XR mennyire terheli meg a szervezetet: vajon volt-e olyan feladat, amelyet egy idő után nehezebben végzett el a jelölt, mert túl sokáig túl sok vizuális (immerzív) információ érkezett?

2.2. A kutatás felépítése

Mindezen kutatási célkitűzésekhez a Control Tower [10] nevű VR-alapú légiforgalom-kezelési szimulációt és a Firstbeat testszenzorát [11] használtuk. Utóbbi egy olyan készülék (1. ábra), amely a mellkasra ragasztva 3–5 napos mérési ciklusokban az illető aktuális állapotát: a stressz-szintjét, a pulzusvariációt (HRV), a fizikai aktivitást és az alvásminőséget képes mérni.

A szívfrekvencia-változékonyság, azaz a HRV az egymást követő szívösszehúzódások közötti időbeni eltérés [12, pp. 85–93]. Korábban már számos kutatás bizonyította, hogy összefüggés van az autonóm idegrendszer és a szívfrekvencia-variabilitás között [13], [14]. A pulzusvariabilitás-értékek nagyon hasonlóak egymáshoz stresszes szituációban (például megterhelő üzleti tárgyalás) vagy kimerítő sporttevékenység közben is. Szimpatikus aktivitás (például stressz, fizikai aktivitás) során nő a pulzusszám és csökken a pulzusvariabilitás, paraszimpatikus aktivitás során (pihenés, feltöltődés) csökken a pulzusszám, nő a variabilitás, azaz a HRV.

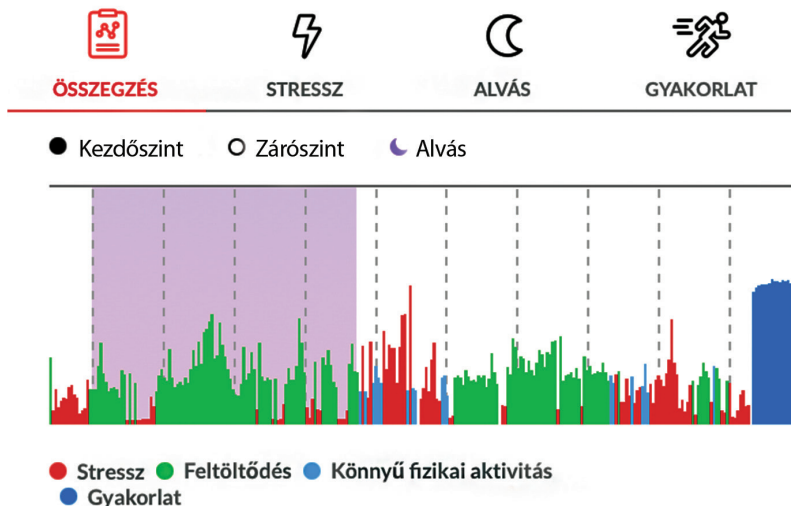
⁹ Heart Rate Variability, szívfrekvencia-változékonyság, pulzusvariáció.



1. ábra

Firstbeat bodyguard 3 készülék és annak felhelyezési módja [11]

Majd ezeket az értékeket és az értékekből kiszámolt adatokat a készülékkel párosított telefon Firstbeat alkalmazásán lehet megnézni, amely egy grafikonon mutatja percre lebontva, hogy a nap folyamán bejegyzett tevékenységek során milyen értékeket mért a testszenzor (2. ábra). A stresszt piros, a feltöltődést (pihenést) zöld, a gyakorlatot (bármilyen fizikailag megterhelő tevékenységet) kézzel jelzi. Azért fontosak ezek az adatok, mert például a HRV az egyik mutatója a stressznek, mivel az autonóm idegrendszeri aktivitást jelzi (tehát alacsonyabb HRV nagyobb megterhelést jelent), a pulzus gyorsasága pedig remek visszajelzés a fizikai megterhelésről.



2. ábra

A Firstbeat telefonos alkalmazása és a grafikon [az applikáció alapján a szerzők]

A Control Tower egy repülésspecifikus szimuláció, amelyben a felhasználó a repülésirányító szerepébe lép – tehát a cél a repülőgépek biztonságos, hatékony és gyors koordinálása (3. ábra). A szabály nagyon egyszerű: mindegyik légi járművet (nagygépet, kisgépet, helikoptert, vitorlázó repülőt) a neki szánt futópályára kell leszállítani, miközben figyelni kell az elkülönítésükre is. Egy leszállított repülőgép egy pontot jelent, azonban ha egy légi járművet nem sikerül biztonságosan leszállítani, a szimuláció véget ér [10]. A gyakorlat akkor számít sikeresnek, ha minél több repülőgépet sikerül leszállítani, és ezzel együtt minél több pontot szerzünk.

A szimuláció kihívása nem a szabályrendszerében van, hanem az egyre nagyobb terhelésben, amit az egyre gyorsabb forgalomnövekedés okoz. A légi forgalom egyre sűrűbb, ezáltal egyre többfelé kell figyelni, hiszen az ütközéseket és a késéseket (elszalasztott repülőgépeket) el kell kerülni. Ez az alkalmazás nagyon jó lehetőség a légi forgalmi irányítók tesztelésére, mivel a stresszhelyzetek által fejleszthető a gyors döntéshozatal és a koncentráció képessége.



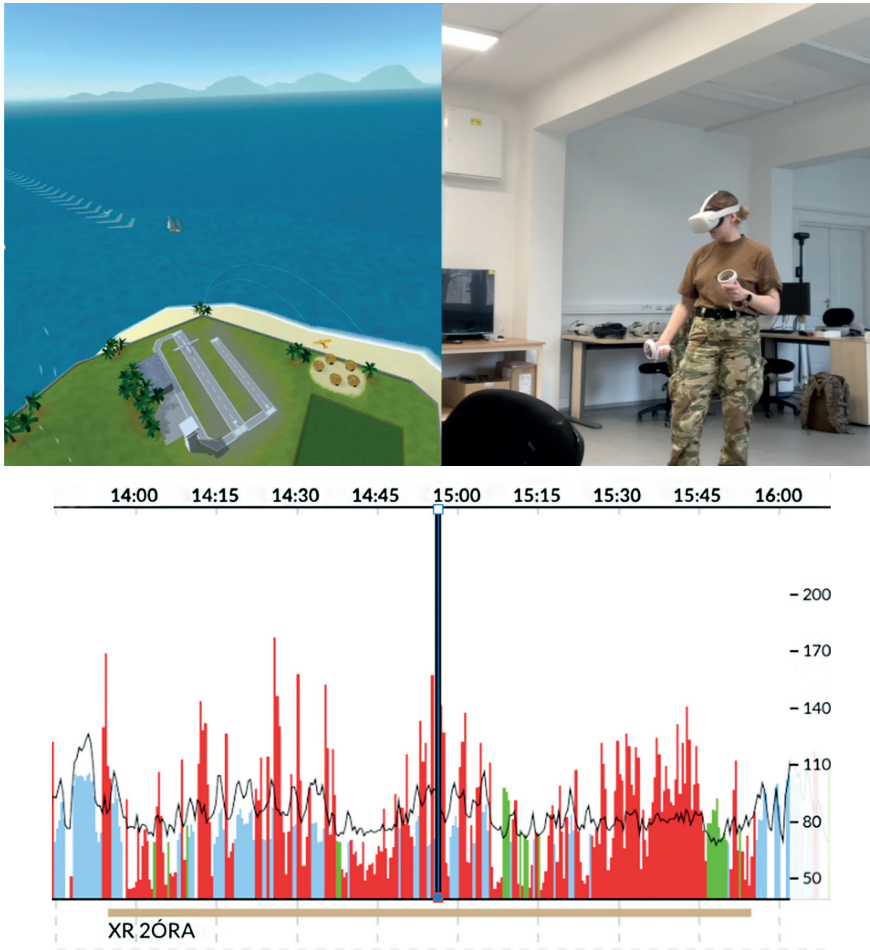
3. ábra
Control Tower szimuláció [10]

A mérési kampányt egy fő tesztalanyon hajtottuk végre, aki a Bodyguard testszenzort 5 napon keresztül folyamatosan viselte, illetve ezen belül egy 72 órás időtartamban összesen 31 alkalommal végzett tesztek.

A kutatásunk metodikája a következőképpen épült fel:

- A tesztalany felhelyezte az 1. ábrán látott módon a Firstbeat testszenzort – ezzel mértük a tesztek során fellépő pulzust és a HRV-t.
- Meta Quest 2 VR-szemüveg [15] használatával elindítottuk a Control Tower szimulációt, amelyet a szemüveg képernyőfelvételével rögzítettünk.
- A szimulációs tesztek végzését külső kamerával vettük fel, hogy a valós fizikai térben látható reakciókat is rögzíthessük.
- Majd összevetettük a kameraképen látott reakciókat a VR belső nézetes szimuláció képével, illetve a Firstbeat által mért adatokkal, mint ahogy az a 4. ábrán is látható.

A külső megfigyelés alapján többnyire nem volt beazonosítható a megnövekedett stresszhelyzet, amit azonban a testszenzoros visszacsatolás kimutatott, vagyis hogy a szimuláció tesztjei mikor váltak egyre megterhelőbbé, és ez növekvő stresszt váltott ki.



4. ábra

Az egymáshoz szinkronizált felvételek egy kiragadott pillanata (felül) és a stresszt jelző grafikon (alul) [a szerzők]

2.3. Eredmények

Az előbb bemutatott módszerrel három nap intenzív XR-tevékenység során számos tesztet folytattunk le pilótjelleggel a tesztalanyon. A tesztek átlagosan 4 perc 15 másodpercesek voltak. Látható, hogy ez rövid időtartamú, azonban a program ennyi idő alatt is viszonylag nagy munkaterhelést, ezzel együtt stresszt tudott előidézni.

Az időben legtovább tartó teszt 10 perces volt (amin a legtöbb pontszámot érte el), ez az első nap következett be, és kiugró teljesítménnyel járt. A teszt alatt 89-es pulzust mért a szenzor, ami a 85,8-as átlagpulzusnál csak egy kicsit magasabb, azonban a HRV értéke 45 volt, ami jóval több az átlagos 38,7-nél. Ebből látható, hogy a háromnapos teszt során rögtön az első napon mutatkozott meg a csúcsteljesítmény, amely átlagos pulzus mellett az átlaghoz képest kiugró HRV-értéket jelentett, ezzel együtt ezt a tesztalany pozitív stresszként élte meg. Ezen mérés adatait az 1. táblázatban sárgával emeltük ki.

1. táblázat
Önkísérlés, 2025. március 8. [a szerzők]

A teszt száma	HRV	Pulzus	HRV-pulzus különbség (stressz)	Eredmény	Időtartam (perc)
1	52	70	18	18	6
2	50	79	29	2	2,5
3	40	80	40	4	3
4	48	80	32	6	5
5	43	80	37	4	4
6	42	85	43	4	4
7	45	92	47	5	3
8	45	89	44	54	10
9	20	79	59	9	5
10	42	80	38	31	7
11	39	82	43	7	4

2. táblázat
Önkísérlés, 2025. március 9. [a szerzők]

A teszt száma	HRV	Pulzus	HRV-pulzus különbség (stressz)	Eredmény	Időtartam (perc)
12	42	83	39	11	3,5
13	39	82	43	10	4
14	43	70	27	14	3,5
15	45	78	33	20	6
16	40	88	48	25	6
17	35	95	60	30	6
18	40	80	40	25	5
19	35	85	50	21	5
20	40	90	50	13	4

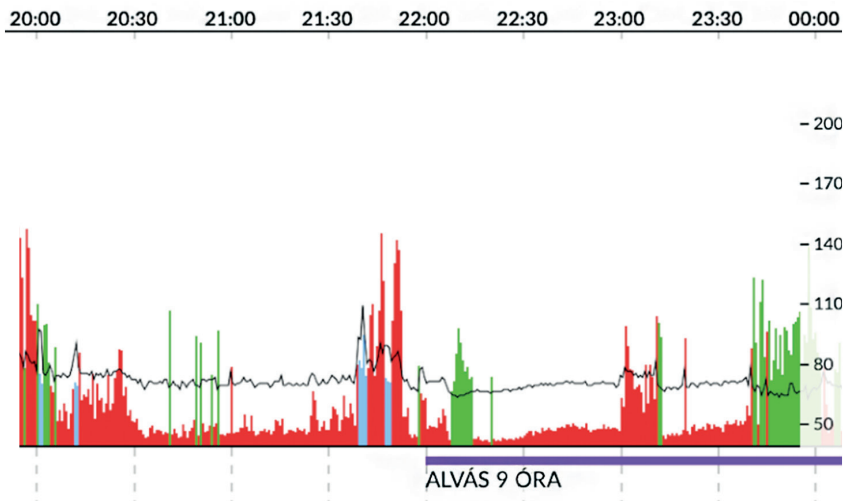
3. táblázat
Önkísérlet, 2025. március 10. [a szerzők]

A teszt száma	HRV	Pulzus	HRV-pulzus különbség (stressz)	Eredmény	Időtartam (perc)
21	33	82	49	8	4
22	32	100	68	25	6
23	31	87	56	N/A	5
24	31	100	69	9	3
25	37	92	55	21	5
26	35	82	47	0	0
27	31	100	69	34	7
28	31	100	69	N/A	4
29	37	95	58	N/A	3
30	38	85	47	11	3
31	38	90	52	9	3

A táblázatok eredményeiből a következőket vontuk le:

1. A pulzus növekvő, míg a HRV csökkenő tendenciát mutat a három nap során összességében – tehát a stressz szintje növekedett, amit a tesztalany is megerősített (hogy ez az XR-használat vagy maga a szimuláció miatt történt-e így, további kutatásra és kivizsgálásra vár).
2. Volt egy olyan sorozat, amelyet késsel jelöltünk a táblázatban a második nap folyamán (2. táblázat), amikor egyenletesen és folyamatosan (5 teszt erejéig) magas pontszámot ért el a tesztalany – ami további kutatási kérdéseket indukált: vajon mi volt más a stresszértékek és egyéb életviteli paraméterek terén (például alvás, evés), mint a többi tesztnél? Mi az a terhelés, ami optimális az egyenletes teljesítőképesség érdekében? További érdekesség, hogy az első napon, mint már említettük, egy teszt erejéig kimagasló csúcsteljesítményt hozott az alany, míg a második napon stabilabban teljesített átlagosan magasabb eredménnyel.
3. Az első nap tevékenysége olyan intenzív volt, hogy az alvás megkezdését követően az első másfél órában stresszértékeket mértünk, amit az 5. ábra jól mutat. További kutatást igényel, hogy ezt mi váltotta ki: az egész napi XR-technológia-használat és az adaptáció hiánya, ezért feltételezhetően a VR-mozgásbetegség,¹⁰ vagy pedig a megterhelő stresszes munkaterhelés.

¹⁰ VR okozta rosszullett akkor jelentkezik, amikor az agy ellentmondásos jeleket kap a mozgásról: például a szem mozgást érzékel, de a test egy helyben marad, ami okozhat hányingert, fejfájást stb.



5. ábra

A mért stressz alvás során a Firstbeat grafikon megjelenítésében [a szerzők]

Az 5. ábrán az látszik, hogy az alvás a kezdeti fázisában, körülbelül másfél órán keresztül nem volt pihentető (nem látunk zöld színű értékeket, ami a feltöltődést, a regenerációt jelzi), sőt még stresszes is volt (piros színű oszlopok).

Mindhárom megfigyelés további kutatásokat indukál, hogy minél szélesebb és pontosabb képet kapjunk a módszer légi forgalmi irányítók képzésébe történő integrálásának érdekében.

3. Zárógondolatok, jövőbeli lehetőségek

A kutatás eredményei ígéretesek, és előremutató lehetőségeket tárnak fel további vizsgálatokhoz és fejlesztésekhez. Habár az XR-eszközök folyamatosan fejlődnek, jelenleg még akadnak korlátok, például a kijelzők felbontása vagy a mozgáskövetés pontossága terén, ami hozzájárulhat a VR-mozgásbetegség kialakulásához, illetve fejlődésüktől a szimulációs élmény javulását is várjuk.

Minden személy más stressztűrő képességgel rendelkezik, amire tekintettel kell lenni a képzési programok kialakításakor. Az egyéni HRV- és pulzusváltozások figyelembevételével a gyakorlatokat adaptív módon lehet személyre szabni, így a képzés hatékonyabbá és a terhelés kontrollálhatóbbá válik. Ez nemcsak a tanulási élményt javítja, hanem segít megelőzni a túlzott stressz okozta teljesítményromlást és kiegészítést is. Mindemellett lehetővé teszi a gamifikációt és a jutalmazáson alapuló előrehaladást a képzésben.

A jelenlegi vizsgálatok még csak egy tesztalany bevonásával történtek, így az eredmények elsősorban iránymutató jellegűek. A hosszú távú cél az, hogy nagyobb csoporton, hosszú távú kutatással igazolni lehessen az XR-technológián alapuló szimulációk hatékonyságát a légi forgalmi irányítók képzésében és kiválasztásában. Így teremthető meg a módszer oktatási struktúrába történő hiteles és alátámasztott integrációjának alapja.

Összességében az XR egy rendkívül ígéretes technológia a légi forgalmi irányítók képzésében. A személyre szabható tréningek és az immerzív gyakorlási lehetőségek jelentősen javítják majd a tanulási hatékonyságot. Noha technikai és kutatási szempontból még vannak kihívások, ezek megfelelő fejlesztésekkel leküzdhetők. A jövőben az XR akár alapjaiban is átalakíthatja a szakmai képzés struktúráját és gyakorlatát.

Felhasznált irodalom

- [1] *Rekordmennyiségű repülőgépet kezelt a HungaroControl 2024-ben*, Hungarocontrol. Online: <https://www.hungarocontrol.hu/sajtoszoba/hirek/rekordmennyisegu-repulo gep-2024>
- [2] *Idén nyáron is jelentős késésekre számít az Eurocontrol*, AIRportal.hu, 2025. április 28. Online: <https://airportal.hu/iden-nyaron-is-jelentos-kesesekre-szamit-az-eurocontrol/>
- [3] Gangler F., *Teljesítmény-diagnosztikai vizsgáló eljárások alkalmazási lehetőségei a repülésirányítók professzionális tevékenységének objektív értékelésében a szenzomotoros teljesítmény változásainak alapján*, ITDK dolgozat, NKE HHK Egyetemi Könyvtár, 2022.
- [4] C. Hurter, M. Causse, M. Cordeil, „Past, Current and Future Trend for the Usage of Extend Reality (XR) in Aviation,” *Aerospace Psychology and Human Factors: Applied Methods and Techniques*, 2025. Online: <https://enac.hal.science/hal-04891766/>
- [5] K. Károly et al., „Extended Reality Possibilities in Air Traffic Management,” *2023 New Trends in Aviation Development (NTAD)*, Stary Smokovec, pp. 134–138. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/NTAD61230.2023.10380138>
- [6] S. Bagassi et al., „Human-in-the-Loop Evaluation of an Augmented Reality Based Interface for the Airport Control Tower,” *Computers in Industry*, 123. évf. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103291>
- [7] N. Masotti, F. De Crescenzo, S. Bagassi, „Augmented Reality in the Control Tower: A Rendering Pipeline for Multiple Head-Trackable Head-up Displays,” in *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*. L. De Paolis, A. Mongelli szerk. Cham, Springer, 2016. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3_23
- [8] R. Santarelli et al., *Towards a Digital Control Tower: The Use of Augmented Reality Tools to Innovate Interaction Modes*, SESAR Innovation Days, Budapest, 2022. december 5–8. Online: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2022/paper_52.pdf
- [9] S. Bagassi et al., „Virtual/Augmented Reality-Based Human–Machine Interface and Interaction Modes in Airport Control Towers,” *Scientific Reports*, 14. évf. 2024. Online: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63731-3>
- [10] *Control Tower VR*. Online: <https://www.meta.com/experiences/control-tower-vr/5241829172562243/?srsltid=AfmBOorR2HbfjVaQ4KfL2NXFossCmVIDRuxYbeR94h0toFpVv-kjHSGcb>
- [11] *Firstbeat Bodyguard 3*. Online: <https://shop.firstbeatsports.global/products/firstbeat-bodyguard-3>
- [12] Dömötör E.: *Pulzuskontroll. Testsúlykontroll*, Budapest, Carita Bt, 2005.
- [13] T. Bogdány et al., „Validation of the Firstbeat TeamBelt and BodyGuard2 Systems,” *Magyar Sporttudományi Szemle*, 17. évf. 3. (67.) sz. pp. 5–12. 2016.

- [14] *Stress and Recovery Analysis Method Based on 24-hour Heart Rate Variability*, Firstbeat Technologies LTD Whitepaper. Online: https://assets.firstbeat.com/firstbeat/uploads/2015/10/Stress-and-recovery_white-paper_20145.pdf
- [15] *Meta Oculus Quest 2*. Online: <https://vr-compare.com/headset/oculusquest2>

Prospective Opportunities for the Training and Selection of Air Traffic Controllers Using XR Technology Supported by Human Performance Diagnostics

The increase in air traffic puts an increased burden on air traffic controllers, and more and more people are needed. Traditional training methods are not always suitable for objectively measuring the success and training progress of candidates, and we assume that one of the keys to success is the individual's performance under increased stress. In our research, we examined, among other things, the relationship between stress and performance using XR-based simulation and human performance diagnostic measurements. The results are promising, but studies on a larger sample are needed for the wider introduction of the method.

Keywords: *air traffic, XR – extended reality, VR–virtual reality, training, selection, human performance diagnostics, stress*

Füstös Julianna repülésirányító hallgató Állami légiközlekedési alapszak Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék fustos.julianna@gmail.com orcid.org/0009-0009-0732-2903	Julianna Füstös ATC student State aviation Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aerospace Controller and Pilot Training fustos.julianna@gmail.com orcid.org/0009-0009-0732-2903
Vas Tímea, PhD tanszékvezető, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370	Tímea Vas, PhD Head of Department, Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aerospace Controller and Pilot Training vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370

Károly Krisztián, PhD
egyetemi tanársegéd
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülésirányító és Repülő-hajózó
Tanszék
karoly.krisztian@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-5835-7980

Krisztián Károly, PhD
Assistant Lecturer
Ludovika University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aerospace Controller and Pilot
Training
karoly.krisztian@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-5835-7980

Tamás Szakács

Orbital Mechanics Two-Body Model for Educational Purposes

Teaching celestial mechanics is a highly rewarding task, as there is hardly a student who is not intrigued by how celestial bodies move across the sky, how an Earth-orbiting satellite stays in orbit, or how one can travel to the Moon, Mars, or further in the solar system and beyond. Even with only high school-level mathematics and physics knowledge, one can understand and describe key operations such as orbit insertion, orbital manoeuvres, and the concepts of escape velocities. To aid the teaching of the subject "Orbital Mechanics", I developed a model in the Matlab/Simulink environment, which is suitable for demonstrating these tasks, providing illustrations, and verifying homework. I emphasised keeping the model simple and easy to use while making it interesting for students. Additionally, it serves as a tool for practicing the use of Matlab/Simulink.

Keywords: celestial mechanics, orbital mechanics, orbital manoeuvres

1. Introduction

In his posthumous work, *De mundi systemate* (published in 1728 as *A Treatise of the System of the World* [1]), Isaac Newton included an illustration explaining the concept of the first cosmic velocity (Figure 1). While Newton could not calculate the exact velocity due to the lack of knowledge about Earth's precise mass and the gravitational constant, he introduced the theory of orbital motion. The second cosmic velocity was published by Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky in 1903 [2]. Both works are accessible online.

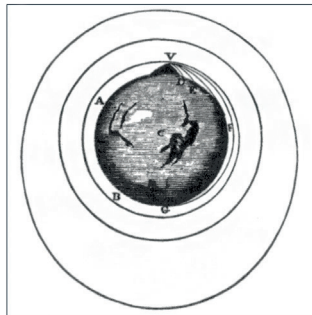


Figure 1.
Newton's explanation of 1st cosmic velocity [1]

The third name worth mentioning is Walter Hohmann, who in his 1925 publication introduced an energy-efficient orbital transfer between two orbits around a celestial body [3]. These concepts are part of the curriculum in orbital mechanics, and the author considered it essential to provide students with an interactive simulation tool, in addition to formulas and diagrams, to enhance their understanding of the material.

2. Modelling

The author developed the model in Matlab/Simulink environment. The Simulink block diagram model is extremely simple (Figure 2). It contains only a rocket propulsion block, a mechanical block named Space object, and a masked block, which at double click loads the necessary data, and launches GUI and animation windows. The core of the mechanical block (Figure 3) is a Matlab S-function, where the equations for orbiting a central celestial body are written in vector form in m-code.

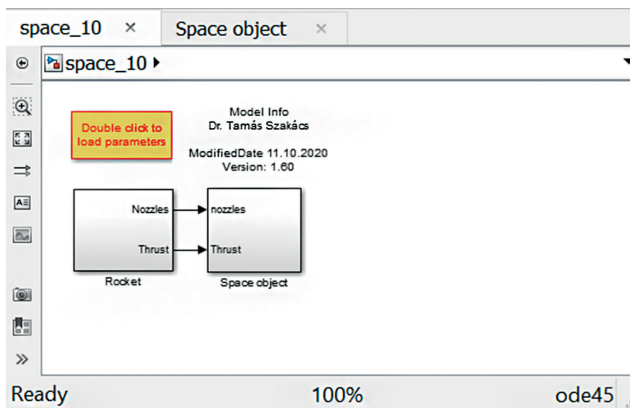


Figure 2.
Top layer of the orbital dynamics model [the author]

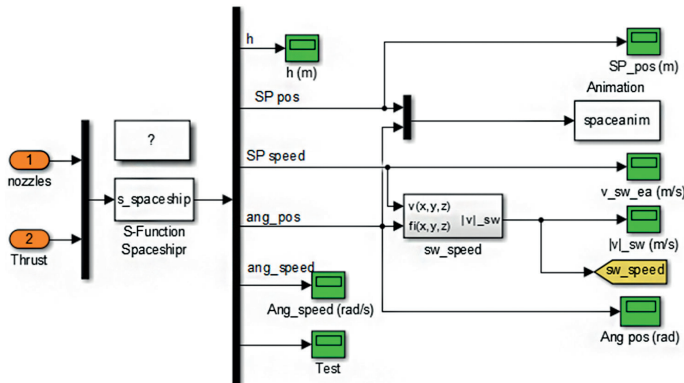


Figure 3.
Detailed view of the object block [the author]

The mechanical part that calculates the mechanical motions of the body consists of a few code lines only. The code also includes an option to toggle between tidal locked and unlocked orbit (Figure 4). The total number of code lines are 175, about half of which are comments, while the rest are necessary lines for the S-function, such as setting initial values of state variables, calculating derivatives, and computing outputs. Thanks to Matlab's matrix-oriented structure, the equations for the derivatives take only three lines (Figure 5). The description for tidal-locked orbits, in contrast, takes six lines.

```

% =====
% === Tidal Lock ===
% =====
if tidal_lock
    vr_sw=(n_SP*x(4:6)'*n_SP); %radial component of speed vector relative to circular orbit
    vt_sw=x(4:6)-vr_sw; %tangential component of speed vector relative to circular orbit
    abs_vt_sw=sqrt(sqrt(vt_sw(1)^2+vt_sw(2)^2)+vt_sw(3)^2); %absolute value of speed vector
    n_vt=vt_sw/abs_vt_sw; % direction of tangential speed vector
    n_w=cross(n_SP,n_vt); % direction of rotation speed
    omega=-abs_vt_sw/r_earthSP2swSP; %rotational speed of object.
    test=[omega*n_w(2); x(11); 0];

    x(10:12)=(omega*n_w); % tidal locked orbit ...
                                % this line constrains the body to be tidal locked.
end
end

```

Figure 4.
Code lines for tidal-locked orbit [the author]

```

%*****
%*           * Altitude from Earth
%*****
r_earthSP2swSP=sqrt((sqrt(x(1)^2+x(2)^2)+x(3))^2); % vector length from Earth SP to space vehicle SP
n_SP=x(1:3)/(-1*r_earthSP2swSP); % direction vector n_SP [0..1, 0..1, 0..1]
g_sw_earth=mu_earth/r_earthSP2swSP^2*n_SP; % gravity vector at space vehicle
%fi_x=atan(SP(1)/SP(2))/pi*180
test=n_SP;

%*****
%*           * Gravity
%*****
ac(1:3)=ac(1:3)+g_sw_earth'; % g is the gravity vector at space vehicle

```

Figure 5.
Determining the magnitude and direction of gravitational force and acceleration acting on the object [the author]

To ensure ease of use, the author developed a graphic user interface (GUI). The model is fully parametric, and parameter handling is managed through the graphical user interface (Figures 6–7). Interestingly, its code consists of 1,443 lines.

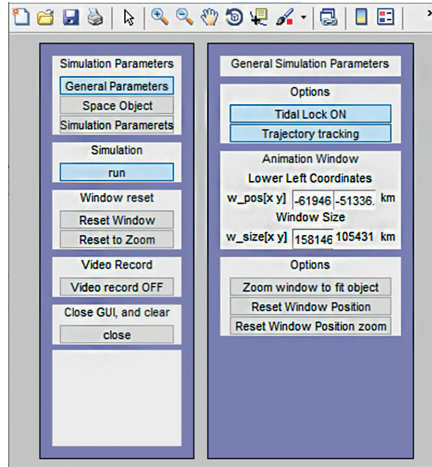


Figure 6.

Graphical User Interface for managing parameters: General settings and options [the author]

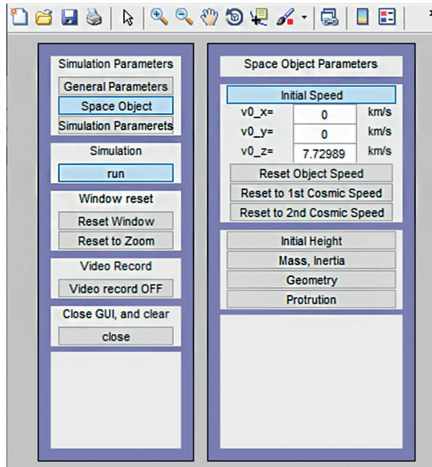


Figure 7.

Graphical User Interface for managing object parameters [the author]

Since the essence of modelling is visualisation, an animation window was also created (Figure 8), where the relative motion of the two bodies can be tracked. This was also coded into the S-function of the animation.

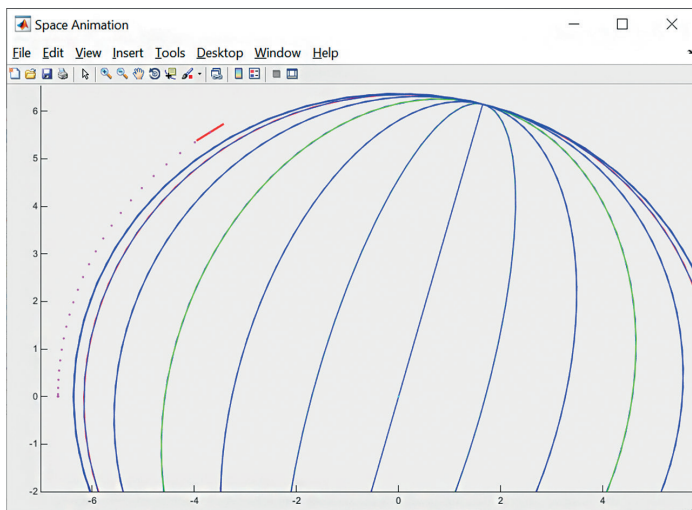


Figure 8.
Animation window [the author]

3. Model usage

Upon loading the model, the previously open windows are restored in the same state. As the model is parametric and the parameters can be managed via the graphical interface, the Matlab window can be minimised. By clicking on the parameter loading block (Double click to load parameters), the necessary simulation parameters are loaded, and the GUI and animation window open. After arranging the windows conveniently (Figure 9), the model can be run from the GUI (this is the recommended approach).

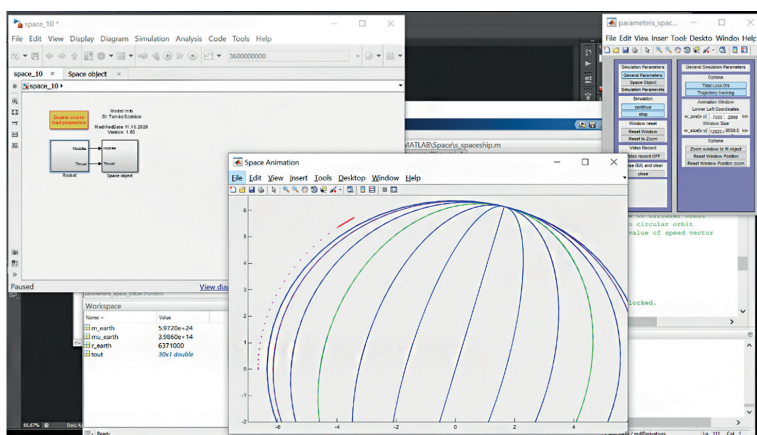


Figure 9.
Layout of the model windows [the author]

Before running, it is advisable to start with the simulation parameters in the general settings, found in the upper left section of the GUI. It includes three radio buttons: general parameters, object parameters, and simulation-related parameters. Pressing any of these will regenerate the right-hand window and display the corresponding parameters.

In the general parameters (Figure 6), the following options can be toggled:

- bounded orbit (Tidal Lock);
- object trajectory tracking in the animation window (Trajectory Tracking);
- screen zoom for simultaneous display of both objects (Zoom Window to Fit Object);
- reset window position before starting the simulation (Reset Window Position);
- reset zoom level before starting the simulation (Reset Window Position Zoom).

These last two functions are always accessible from the left menu for convenience. Additionally, the initial position and view range of the animation window can be set here.

Figure 6 shows the object parameters that can be modified:

- initial velocity in km/s;
- initial altitude from the center of the Earth in km;
- mass and moment of inertia;
- geometrical properties of the object;
- (the propulsion section is currently inactive).

Each tab contains further options, such as calculating, and setting the 1st and 2nd cosmic velocities for a given initial altitude, which the interface also displays. Doing this will result in a circular orbit at that predetermined height.

Additional features: The previously mentioned Reset Window and Reset to Zoom functions are available, as well as a button for recording the model's animation for video creation.

After setting the parameters, the model can be run. The phases of execution are shown in Figure 10.

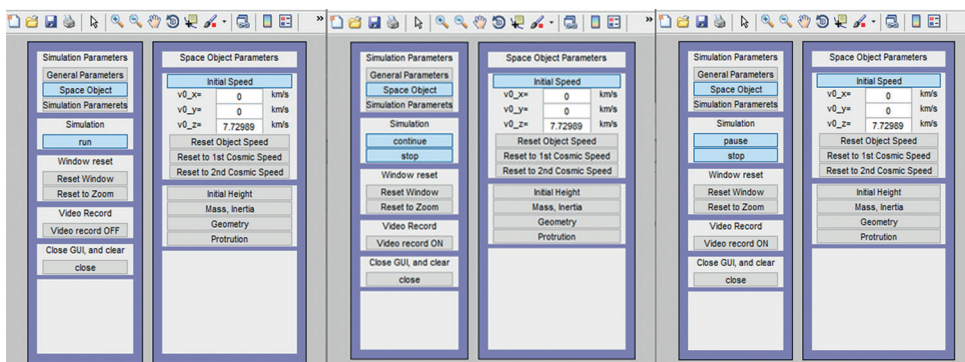


Figure 10.
Run Modes: Run, Pause/Stop, Continue/Stop [the author]

When clicking the run button, the label switches to pause and stop buttons, allowing the simulation to be paused or stopped. During suspension, the pause button changes to continue, resuming the simulation.

4. Example of running the model

As an example, an orbital transfer from 300 km circular orbit about Earth surface to a geostationary orbit using a Hohmann manoeuvre will be presented. First, we set a $H = 300$ km orbit by selecting the Space Object parameter and setting the Initial Height. The average radius of the Earth is $R = 6,371$ km, so the orbit is at $R + H = 6,671$ km measured from the centre of Earth. Then, we set the corresponding 1st cosmic speed for the altitude using the "Reset to 1st Cosmic Speed" button. The result is an initial velocity (v_{0z}) of 7.2989 km/s, as Figure 11 shows.

The first cosmic speed at 300 km height:

$$v_i = \sqrt{\gamma \frac{M}{r}} = \sqrt{\frac{K}{r}} = \sqrt{\frac{K}{(R + H)}} = \sqrt{\frac{398620}{6371 + 300}} = 7.2989 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Where γ is the universal gravitations constant: $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$, and M is the mass of Earth, $M = 5,976 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $K = \gamma M = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,976 \cdot 10^{24} = 398620 \frac{\text{kgkm}^3}{\text{s}^2}$

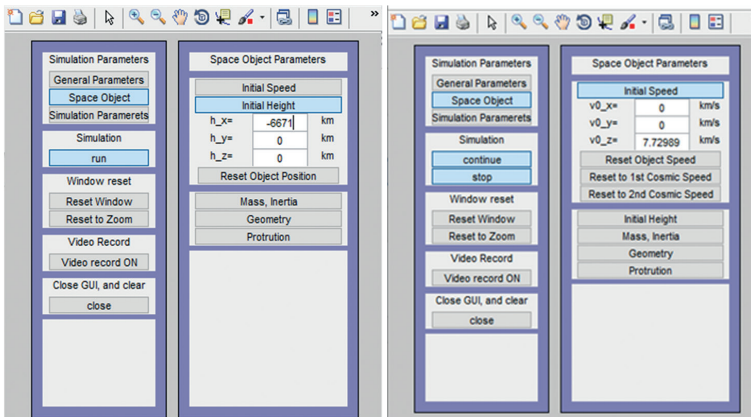


Figure 11.
Setting the parameters [the author]

The rocket propulsion setup follows. The rocket engines are programmed in the Rocket block of the Simulink model (Figure 12). Currently, the model includes two Hohmann manoeuvres: the first applies an initial impulse after completing one orbit, followed by a second impulse at the opposite side of the Earth when the new altitude is reached. The second variation completes the first impulse, returns to the original starting point on the Hohmann transfer ellipse, and only then performs the second impulse when the rocket is at the opposite point at the second time. This variation is for demonstration purposes only.

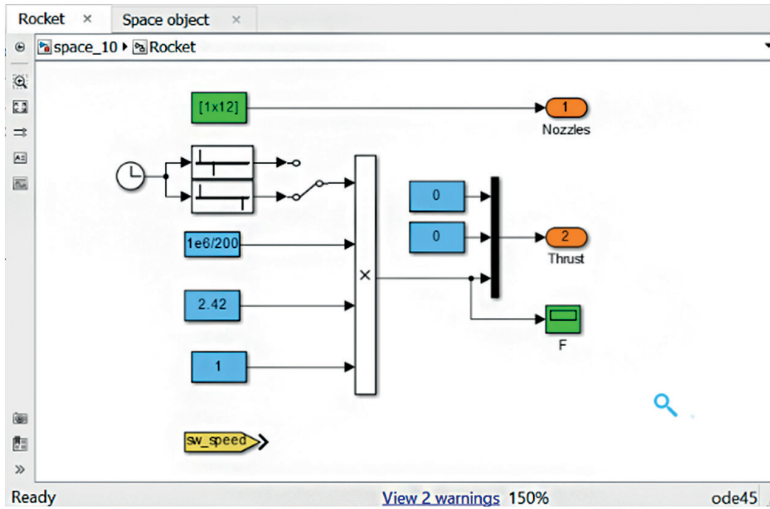


Figure 12.
The rocket and nozzle model [the author]

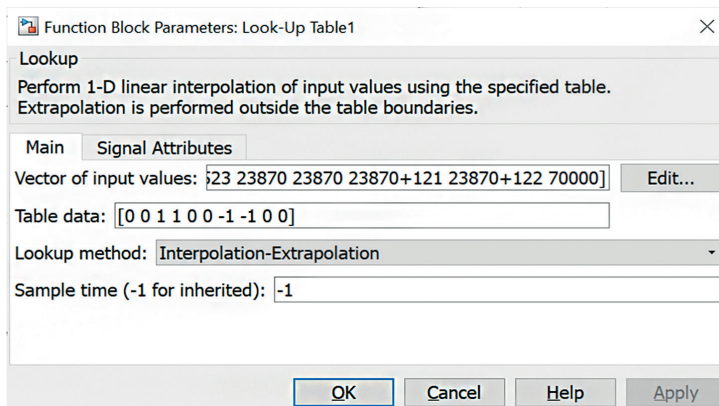


Figure 13.
Programming the rocket engine [the author]

After programming the rocket, clicking on Reset Window, Reset to Zoom, and Run starts the simulation.

The results are shown in Figures 14–18.

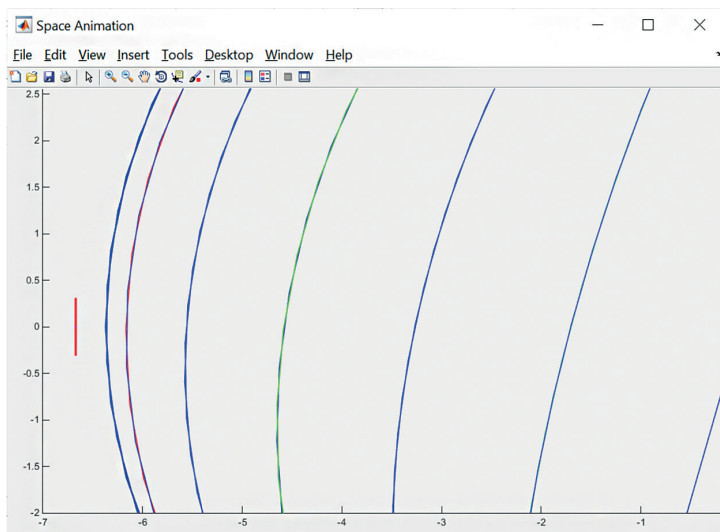


Figure 14.

Beginning of the simulation: the object in its initial position [the author]

Figure 14 shows the initial state at the beginning of the simulation. Initial position and speed are set in the parameters. The figure is to scale (except the space object), so one can see how far 300 km from Earth surface is.

As the space object moves, it is flying out of the window. Because autozoom is on, when it occurs, the window resolution is automatically resized to have centre of Earth, and the space object in the same window. Trajectory tracking is also on, that plots the purple dots behind the space object.

Completing one round, the space object returns to its original position. The rocket propulsion is programmed so that the first impulse occurs at this point. Burning time and thrust force are programmed in the rocket module (Figure 16).

In Figure 17 the object reached the new orbit height (apogee), where the second burn should occur to reach the first cosmic speed according to that distance. In this demonstration the burn does not occur, so the object completes the ellipse, and returns to the starting point (perigee). So, the orbit is now changed from circular to elliptical. Reaching the apogee again the second burn is initiated in the model, which accelerates the object to reach first cosmic velocity at that distance, so the object will orbit in a circular path again (Figure 18).

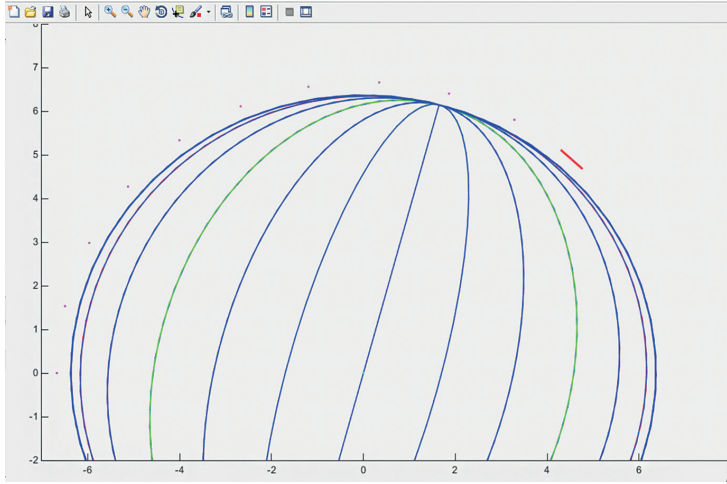


Figure 15.

As the object leaves the window's displayed area, the autozoom adjusts the window [the author]

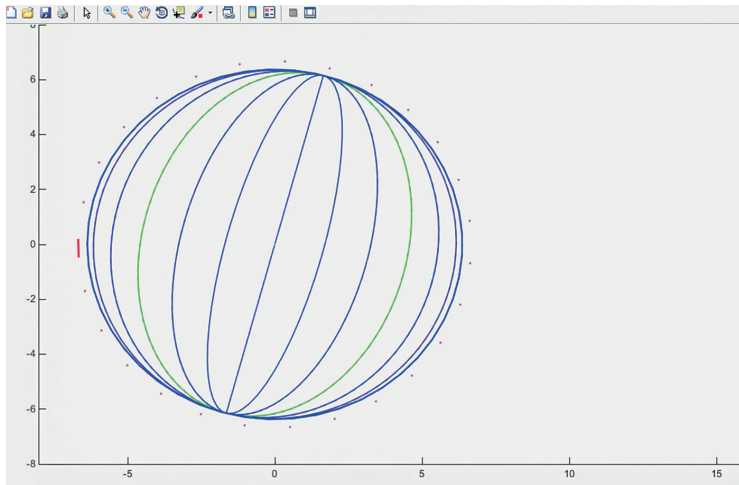


Figure 16.

The first impulse starts at the end of the first complete orbit [the author]

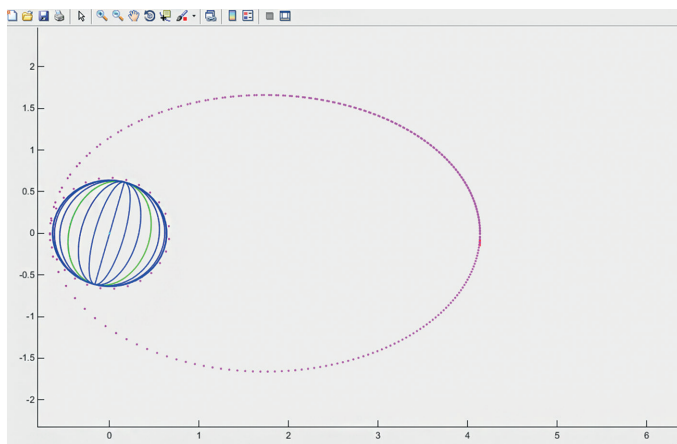


Figure 17.

The space object completes the Hohmann ellipse (demonstrational purpose). Second impulse [the author]

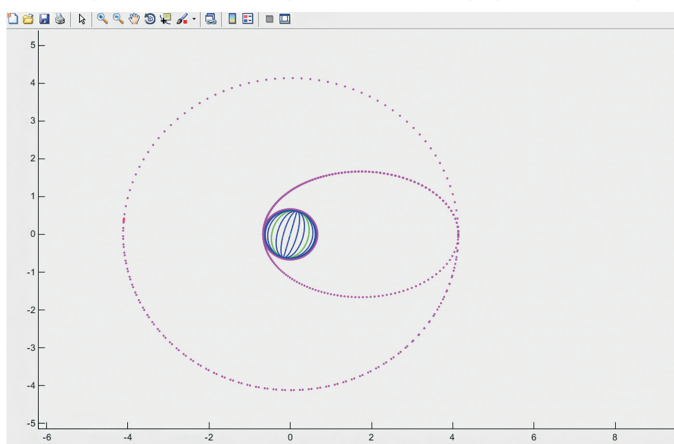


Figure 18.

The new geostationary orbit [the author]

So far, 61,400 simulation seconds have passed, which took only 60 seconds on a standard office laptop.

5. Further development suggestions

Currently, the model can simulate two-body systems. It is set to model Earth and a space object, but it can be adapted for any two-body system (e.g. Sun–Earth, Earth–Moon). Extending it to a three-body model would allow the simulation of slingshot manoeuvres or any three-body system (e.g. Sun–Earth–Moon or Earth–Moon–artificial satellite). After converting it into a three-body model, it can be further developed into an N-body model to model complex orbiting problems, or travelling with an object from planet to planet in the solar system.

6. Summary

This article presents the construction and usage of an orbital dynamics model. The model is intended for educational purposes in physics and orbital mechanics, allowing the demonstration of the first and second cosmic velocities, different orbits, and orbital manoeuvres. Developed in the Matlab/Simulink environment, it is also useful for teaching and practicing Matlab usage. The model is extremely simple in design and easy to use even without prior Matlab knowledge.

References

- [1] I. Newton, *De mundi systemate. A Treatise of the System of the World*. 1728.
- [2] К. Циолковский, *Исследование мировых пространств реактивными приборами*. 1903.
- [3] W. Hohmann, *Die Erreichbarkeit der Himmelskörper*. München, R. Oldenbourg, 1925.

Ürdinamikai kéttest-modell oktatási célra

Az égi mechanika oktatása rendkívül hálás feladat, mivel nincs olyan diák, akit ne érdekelne az, hogy az égitestek hogyan mozognak az égbolton, vagy egy Föld körüli pályára állított műhold miért marad pályán, vagy hogyan lehet eljutni a Holdra, Marsra vagy nagyobb távolságokra a Naprendszerben, vagy azon túl. Már középiskolai szintű matematikai és fizikai ismeretekkel is meg lehet érteni, illetve le lehet írni a legfontosabb műveleteket, mint például a pályára állás vagy a pályamódosítások, az első és a többi kozmikus sebességek. Az úrdinamika című tárgy oktatásának segítésére létrehoztam egy olyan modellt Matlab/Simulink környezetben, amely alkalmas a fent említett feladatok bemutatására, szemléltetésére, házi feladatok leellenőrzésére. Fontosnak tartottam, hogy a modell egyszerű maradjon, könnyen kezelhető, mégis érdekes legyen a hallgatók számára. Nem utolsósorban a Matlab/Simulink programkörnyezet használatának gyakorlását is segíti.

Kulcsszavak: égi mechanika, úrdinamika, pályamódosítások

Szakács Tamás, PhD
egyetemi docens
Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai
Mérnöki Kar
Jármű és Mechatronikai Intézet

szakacs.tamas@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-7636-7488

Tamás Szakács, PhD
Associate Professor
Óbuda University

Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety
Engineering
Institute of Mechatronics and Vehicle
Engineering

szakacs.tamas@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-7636-7488

Gábor Terpez, György Schuster

Application of Drones in Electrical Power Engineering

Drones, also known as unmanned eVTOL aircraft, have undergone significant development in recent years and are finding more widespread application in various industries. The electricity sector is no exception, where drones offer innovative solutions compared to traditional methods. The introduction of drone technology into the electricity industry has radically transformed operating methods, significantly reducing the high costs and risks associated with traditional control techniques. Drones have become an essential tool for regular monitoring of critical energy infrastructure elements such as power lines, wind farms and solar farms.

Keywords: eVTOL, drone, power line, solar park, wind turbine, electrical energy

1. Introduction

Equipping drones with various sensors allows you to perform complex surveillance tasks that exceed the capabilities of traditional visual inspection. For example, thermal imagers can detect overheating problems, multispectral sensors can assess vegetation around solar panels, and LiDAR systems can be used to create detailed maps. This advanced sensor technology allows for a deeper and more accurate assessment of the state of the energy infrastructure, revealing hidden flaws and problems that were previously invisible.

2. Network monitoring and maintenance

Drones are powerful tools for remote monitoring and maintenance of power grids. With their help, sources of defects such as insulation defects, contact with tree branches or other foreign objects and damage to support pillars can be quickly and accurately identified. Especially after storms, foreign objects often get on the power lines that make up the power grid, or trees grow near it and affect the power line can cause a short circuit [24]. Detecting them can be done quickly and safely with the help of drones. Drones equipped with thermal imaging cameras can be used to easily identify overheated or damaged insulations that could pose a fire hazard. Some drones are able to travel long distances over wires, thus detecting network failures, corrosion, or other damage. Another advantage is minimising trampling damage [17]. Using traditional technology, vehicles must be pulled out to the supports involved in the inspection, sometimes causing serious damage to agricultural crops or valuable vegetation. Drones can be used to conduct inspections and surveys faster and more cost-effectively.

Drones can conduct hazardous tasks, significantly reducing safety risks for workers and maintenance costs. Since potential problems can be detected earlier, major breakdowns can be avoided. Drone operations provide the collection of high-precision data based on which more accurate decisions can be made. Operations can even be tracked online, processes can be digitally recorded and evaluated later. Last but not least, thanks to the mostly electric drive, their ecological footprint is quite small [9], [11].



Figure 1.
Vegetation near the wires [23]

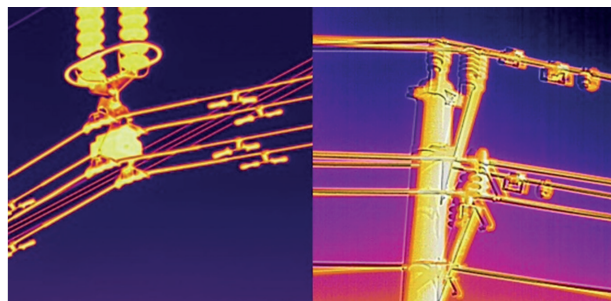


Figure 2.
Detection of insulation defects [6]

3. Health check of solar parks

Drones can quickly cover large areas, making them ideal tools for assessing the condition of solar parks. With the help of cameras and sensors installed on drones, detailed data can be obtained on the state of the infrastructure, which allows necessary repairs and maintenance to be carried out in a timely manner [7]. In order to meet today's growing energy demands [19], service providers need to install thousands of solar panels covering ever larger areas [15]. In traditional solar panel health assessment, handheld thermal imagers are used to inspect panels to check the condition of cells and cables. However, this method is not efficient enough, as maintainers must manually locate faulty cells, which can be extremely time-consuming and sometimes dangerous, and places considerable strain on maintenance and operation units. The integration of drone technology into the inspection processes of solar farms has resulted in significant efficiency gains and increased accuracy. Drones can be used

to identify contaminated or shaded solar panels that reduce the park's performance. Drones equipped with thermal imaging systems are capable of mapping large solar farms in a single flight, capturing high-resolution RGB and thermal imaging images or videos [21]. Based on the heat maps made with the infrared camera, faulty modules or overheated connections can be identified. Inspection operations from the air are ongoing, especially in heated problem areas heavily exposed to the sun's rays, where technical teams face significant challenges. The use of drones allows operators to reduce inspection time by up to 70%, which is a significant time saving compared to traditional methods [12], [18].



Figure 3.
Checking a solar park using a drone [1]

3.1. Thermal (infrared) inspections

This is one of the most widespread and important inspections conducted by drones. Thermal cameras (infrared thermal imaging) analyse surface temperature distribution and are capable of detecting numerous issues, including the following:

- identification of hotspots;
- shade problems;
- inverter and system failures.

3.1.1. Identification of hotspots

Hotspots are areas on solar panels where the temperature is higher compared to the rest of the panel. In these areas, the cell temperature can reach up to 150 °C, which can lead to permanent and irreversible damages, such as glass cracking or cell degradation. The formation of hotspots is common, but predicting their exact location is extremely difficult. In many cases, the failure of solar panels occurs due to overheating caused by hotspots, which reduces energy performance and can damage the devices in the long run. The emergence of hotspots can be clearly observed in thermal images captured by drones (Figure 4). Sometimes, hotspots appear as brown marks or other visible damage on the surface of the panel, but in most cases, these hot spots are invisible to the naked eye. A study conducted in the United States analysed photovoltaic modules operating over a 1–3-year period to investigate the causes of module failures and malfunctions. Among the 115 modules examined, 22% had lost their energy-producing capability due to hot spot effects [3].

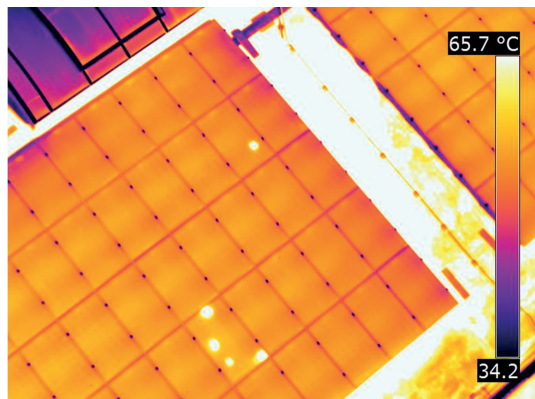


Figure 4.
Hotspots on solar cells [2]

3.1.2. Detection of microcracks

During the manufacturing of solar panels, various materials and technologies are present that can contribute to the formation of microcracks in the manufacturing process. The quality of the materials used in the production of solar panels (e.g. silicon, glass) is of fundamental importance. Contaminants or defects in the materials, such as the use of improper types of silicon during manufacturing, can lead to the appearance of cracks. The production of silicon cells is based on thermal treatment processes, and improper execution of these processes can generate stresses, thereby increasing the risk of microcracks. Temperature fluctuations can also cause additional problems. Solar panels are exposed to various temperature conditions, which can significantly affect their performance and lifespan. The constant expansion and contraction caused by sunlight put serious stress on the solar panels.



Figure 5.
Tiny cracks on the surfaces [22]

For example, thermal stress can lead to the formation of tiny cracks on the surfaces of the cells (see Figure 5). Different thermal expansion coefficients, such as those of glass and silicon, can create tensions due to their varying rates and degrees of expansion. Mechanical stresses can also cause additional microcracks. Since solar panels can be affected by various mechanical impacts, such as hail, the weight of snow, and wind load, these not only influence the physical integrity of the solar panels but can also lead to the occurrence of microcracks. Intense wind gusts and the weight of snow or ice present particularly critical problems, causing the panel structure to undergo flexible deformation, which contributes to the formation of cracks. Over time, the materials of solar panels age, leading to a decrease in light absorption capacity and deterioration of mechanical properties. Aging processes also affect the performance of the cells, especially due to long-term environmental impacts that induce material fatigue, such as ultraviolet (UV) radiation or the combined effects of heat and moisture, which can contribute to the spread of microcracks.

3.1.3. Shade problems

If a panel is in shadow (due to, for example, dirt, plants, or surface defects; Figure 6.), its performance changes, which is also reflected in the heat distribution. Localising such defects is critical for increasing efficiency. Shading, whether natural (such as trees or buildings) or artificial (such as dust or pollution), can reduce the performance of solar panels.

The variations in performance between the cells due to different shading levels can cause significant losses in energy production, reducing the overall energy output.



*Figure 6.
Shaded cells [10]*

3.1.4. Identification of inverter and system faults

Due to improper functioning, the panels can overheat at the system level. Drones can be used to examine temperature variations in the panels associated with different inverters.

3.2. Inspections with general and RGB camera

Drones also capture data using conventional or RGB¹ cameras, which are important for providing information during condition assessments. The images obtained from the cameras can reveal visible physical damages such as broken, cracked, or displaced panels, as well as other external anomalies. They also effectively assist in identifying contaminants or deposits like dust, bird droppings, or leaves, which can significantly reduce the efficiency of the panels. Structural element inspections are common in assessments conducted with traditional cameras; however, beyond the panel-supporting scaffolding, there is also the opportunity to assess the condition of attachments, cabling pathways, or other infrastructural elements. When installed on the ground, the extent of any undergrowth is important, as it can potentially cause dangerous shading on panels mounted on low supports (Figure 7).



Figure 7.
Solar panels installed on the ground [5]

3.3. Multispectral and hyperspectral measurements

Drones equipped with multispectral (Figure 8) or hyperspectral cameras capture images across multiple wavelengths (e.g. UV, infrared, near-infrared). These cameras can reveal issues that neither thermal cameras nor RGB cameras can detect. One such issue is the detection of panel degradation caused by the PID² effect which can lead to a significant decrease in energy production.

¹ RGB camera – this camera takes photos in red, green, and blue colours.

² PID – Potential-Induced Degradation.



Figure 8.
Multispectral drone camera [8]

4. Inspecting of wind turbines

Wind energy is one of the fastest-growing sources of renewable energy, with wind farms becoming increasingly larger and more complex. Turbines often exceed heights of one hundred meters, and blade lengths may surpass eighty meters (Figure 9).



Figure 9.
Wind farm in Mosonmagyaróvár [14]

As wind farms grow in size and scale, maintaining the infrastructure becomes increasingly challenging. Traditional inspection methods such as rope access technicians, cranes, or helicopters are time-consuming, expensive, and risky. The maintenance and inspection of wind turbines are critical for ensuring optimal performance and maximising energy output while minimising downtime and operational costs. In recent years, the use of drones, also referred to as Unmanned Aircraft Systems (UAS), has revolutionised the way wind turbines are inspected. Drones allow for faster, safer, and more cost-effective inspections compared to traditional methods such as manual climbing or ground-based imaging systems. The mechanical components of wind turbines are constantly exposed to environmental influences such as dust, rain, snow, hail, lightning strikes, or corrosion caused by salt air. These damaging

factors have a significant impact on the performance or lifespan of wind turbines. But additional factors such as cracks caused by extreme load fluctuations or defects due to blade manufacturing technology, such as layer detachment, also contribute to damage to turbine blades or generator. There are generally two main methods used to check the mechanical components of wind turbines:

1. Tower and foundation inspection
2. Rotor blade condition check

The other method involves a thorough inspection of the blades, using a telephoto lens to assess the condition of the rotor blades.

4.1. Tower and foundation inspection

Inspection of the tower and foundation is usually conducted traditionally, using the rather dangerous rope technique, using platforms on platforms or visually observing them from the ground (see Figure 10).



Figure 10.
Inspection of wind turbines from the ground [25]

The advantage of ground observation is that it is generally safer and more cost-effective because there is no need to work at height, which reduces the risk of accidents and injuries and insurance costs. However, the disadvantage is that certain parts, such as the internal structure of the blades, are not always sufficiently visible or accessible from the ground, so the inspection may not be complete. Another problem is that the resolution and level of detail of the tools used in ground-based inspections may not always reach the level of direct, field inspections. During tower inspections, the structural integrity is assessed, and the condition of the welded joints is analysed. The turbine tower can be examined in detail with the assistance of drones, allowing for the detection of corrosion, dents, cracks, or other structural defects. Additionally, weak points located in the welding seams of the tower can be identified using infrared thermography, employing a non-destructive testing method.

4.2. Rotor blade condition check with rope technology

The use of rope technology or platforms usually requires the presence of more than three specialists on site, which entails significant wage costs. The use of rope technique poses a high risk [16] for technicians, as they work at height, which increases the possibility of accidents and injuries. These methods are extremely time-consuming to implement, as technicians can only inspect one or two turbines per day. Working at heights carries additional risk factors that also increase insurance costs. The use of rope technology is influenced by weather conditions, such as intense winds or precipitation, which can hinder work and increase risks (Figure 11).



Figure 11.
Application of rope technique [14]

4.3. Rotor blade inspection with drone technology

Drones, equipped with advanced imaging sensors and artificial intelligence (AI), present an innovative alternative, allowing wind farms to be inspected quickly, accurately, and efficiently [5], [20]. Drones can be used to examine the surface of the rotor blades in detail and also identify cracks, dents, or other damages [16]. With the help of drones, the condition of the tower and foundation can also be checked, so corrosion damage or structural defects can be detected in time. Drone-based technology allows technical personnel to access any part of the wind turbines, allowing them to fully assess the machine's operating condition, determine the extent of damage and what needs to be done to optimise performance. Unlike previous time-consuming and costly inspection procedures that required the use of specialised equipment and human resources, modern drone technology provides precise and up-to-date information about necessary repairs or modifications, significantly speeding up and optimising the maintenance process [13].



Figure 12.
Inspection of wind turbines by X-ray technology [4]

4.4. *The advantages of drone-based investigations*

Traditional inspection methods, such as rope technology, pose significant risks to personnel. The utilisation of drones eliminates direct physical interaction, thereby considerably reducing the risk of accidents. Drones are capable of inspecting an entire turbine within a matter of minutes, whereas conventional methods may take hours or even days. This presents a substantial advantage, particularly for larger wind farm installations. The elimination of rope technology, helicopters, or heavy machinery can also lead to significant cost reductions [26], [27]. Moreover, expedited inspections decrease losses associated with energy production downtime. The high-precision data captured by drones facilitate the early detection of faults that conventional methods may overlook. Regular and frequent inspections support predictive maintenance, which anticipates potential failures, thus lowering repair costs and minimising unplanned outages.

5. Economic advantages of drone applications

The principal adversary of energy facilities is unplanned downtime. Each minute of inactivity can lead to substantial revenue losses and potentially jeopardise safety under critical circumstances. Traditional inspection methods have often necessitated the cessation of operations, which can extend for prolonged periods, thereby plunging facilities into a state of uncertainty both literally and metaphorically. The integration of drones aims to enhance inspection processes and reduce downtime by eliminating the necessity for scaffolding, thereby equipping the maintenance team with comprehensive information prior to scheduled downtimes. Drones facilitate the inspection of specific assets while operations are ongoing or not entirely ceased. Furthermore, the use of drones entails fewer safety protocols compared to human personnel,

as well as expedited and more adaptable deployment times, resulting in a diminished requirement for equipment mobilisation for inspections. It is essential to acknowledge that drones not only expedite the resumption of power plant operations but also contribute to the prevention of unexpected shutdowns by promoting enhanced preventive maintenance practices and transforming inspections from reactive protocols to proactive strategies.

6. Challenges and future prospects

Although drones offer many benefits in the energy sector, there are still many challenges to their application. These include, for example, legal regulations, data protection, range, and weather conditions, as well as requirements for operators that vary from continent to continent. In the future, drone technology is expected to continue to develop and become more widespread in the electricity sector.

7. Conclusion

Drones have significant potential in the energy sector. By making inspections and surveys more efficient, safe, and environmentally friendly, drones can contribute to increasing the reliability and sustainability of electricity systems. Drones are not only suitable for visual inspection, as their advanced sensors allow them to take measurements in a wide spectrum, from temperature signals to gas leak detection. This capability enables comprehensive monitoring of energy infrastructure to provide critical data to help develop maintenance and safety protocols. The collection of real-time, high-quality data reduces the need for human intervention, thereby reducing the risk of workers working in hazardous conditions.

References

- [1] A. Bobitech, "Checking a Solar Park Using a Drone," *Aerial Solar Panel Thermal Inspection*, 7 February 2022. Online: https://www1.djicdn.com/cms_uploads/ckeditor/pictures/4381/content_f487f023d8fa7514787f67e81633412a.png
- [2] ABJ Drones, "Hotspots on Solar Cell," *ABJ Drones*, 23 January 2024. Online: https://abjdrones.com/wp-content/uploads/2018/04/Thermal-Solar-Panel-Inspection-Services_2.jpg
- [3] B. Bryan, "How Can Hot Spot Affect Solar Panels?" *Maysun Solar*, 11 July 2023. Online: <https://www.maysunsolar.com/blog-how-can-hot-spot-affect-solar-panels/>
- [4] Brapegas, "Engineering Services with Drone Technology," *Brapegas.com*, 2024. Online: https://brapegas.com/wp-content/uploads/2020/10/shutterstock_1244576212-1536x1020.webp
- [5] Connect Tech, "Designing an AI Driven Inspection Drone for Wind Farms," *ConnectTech*, [s. a.]. Online: https://connecttech.com/ftp/pdf/Autonomous-Machines_Alerion.pdf
- [6] <https://dji-official-fe.djicdn.com/dps/e27db4b0551485b80dad54d454ff3cb3.jpg>

- [7] Drone Life, *Maintaining Solar Assets with Drones. A Guide to Maximizing Performance & Revenue with Aerial Thermography*. 2024. Online: https://drive.google.com/file/d/1wj-S7hd67cKcr6pJJ_RLhBlz2c7o5SRCn/view?usp=sharing&__s=hqvsjwi6bheugv78w-puq&utm_source=drip&utm_medium=email&utm_campaign=Drone+solar+guide+you+requested!&usp=embed_facebook
- [8] DSRL Pros, "Multispectral drone camera," *DSRL*, 12 February 2024. Online: https://www.dsrlpros.com/products/micasense-rededge-blue-multispectral-kit?_pos=40&_sid=98bd14679&_ss=r
- [9] EASA, "Introduction to Environmental Footprint Aviation Study for Drones & eVTOLs," *EASA*, [s. a.]. Online: <https://www.easa.europa.eu/en/en/domains/drones-air-mobility/drones-air-mobility-landscape/noise-sustainability/sustainability-environmental-footprint>
- [10] La Solargroup, "Shaded Cells," *La Solargroup*, 2021. Online: <https://la-solargroup.com/wp-content/uploads/2021/11/Solar-Modules-Under-The-Sunlight.jpg>
- [11] M. Hjalmarsson, "How Much CO₂ is Saved by Switching from Helicopters to Drones for Power Line Inspections?" *Airpelago*, 27 January 2024. Online: <https://www.airpelago.com/news/co2-saved-switching-from-helicopters-to-drones-for-power-line-inspections>
- [12] Microavia, "Drones for Energy Sector and Utility Inspection," *Microavia*, [s. a.]. Online: https://microavia.com/solutions/drones_in_the_energy_and_utility
- [13] Nearthlab, "Inspection Services," *Nearthlab*, 15 June 2024.
- [14] B. Pötter, "Wer soll das alles machen?" *Taz.de*, 9 July 2022. Online: <https://taz.de/Umsetzbarkeit-der-Energiewende-Plaene!/5863843/>
- [15] POWER, "Solar PV O&M Best Practices in a Rapidly Changing Market," *POWER Magazine*, 1 April 2016. Online: <https://www.powermag.com/solar-pv-om-best-practices-rapidly-changing-market>
- [16] W. Raaijen, "Drones Inspect Wind Turbine Blades with X-ray Technology," *Industry Linqs*, 22 November 2021. Online: <https://www.industrylinqs.com/summit/2021/11/drones-inspect-wind-turbine-blades-with-x-ray-technology/>
- [17] E. Rahne, "Energetikai rendszerek és a légi termográfia," *Villanyserelők Lapja*, Vol. 17, No. 10 p. 10, 2018.
- [18] R. Bliss, "Drones Reduce Solar O&M Costs by \$1,254 per MW," *Energy Central*, 4 May 2020. Online: <https://energycentral.com/c/cp/drones-reduce-solar-om-costs-1254-mw>
- [19] SEIA, "Solar Industry Research Data," *SEIA*, 18 June 2024. Online: <https://www.seia.org/solar-industry-research-data>
- [20] Solomon, "Wind Turbine Inspection Using Drones + AI," *Solomon*, [s. a.]. Online: <https://www.solomon-3d.com/case-studies/meta-aivi/wind-turbine-inspection-drones-ai>
- [21] M. Keene, "These Four Technologies Are Changing Solar Inspection," *Solar Power World*, 10 December 2020. Online: <https://www.solarpowerworldonline.com/2020/12/these-four-technologies-are-changing-solar-inspection/>
- [22] Your Energy Answers, "Tiny Cracks on the Surfaces," *Yourenergyanswers.com*, 13 December 2022. Online: <https://yourenergyanswers.com/wp-content/uploads/2022/10/Untitled-design-2022-12-13T160937.433.jpg>
- [23] Axpo Group, "LINIA® Automated Inspection", *Axpo Group*, [s. a.] Online: <https://www.linia.ch/assets/images/3-tr1420-uz250-tr1420-uz251-33-2000x1333.jpg>
- [24] Green Vista Tree Care, "Tree Branches Touching Power Lines," *Green Vista Tree Care*, 23 February 2021. Online: <https://greenvistava.com/tree-branches-power-lines>

- [25] Manual Telephoto Camera, [s. a.]. Online: [https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2016/02/Manual-Telephoto -Camera-Edited.jpg](https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2016/02/Manual-Telephoto-Camera-Edited.jpg)
- [26] ClearSpot.ai, "Cost-Benefit Analysis: The Financial Impact of Drone Inspections on Pipeline Maintenance," *LinkedIn*, 24 December 2024. Online: <https://www.linkedin.com/pulse/cost-benefit-analysis-financial-impact-drone-inspections-elnvc/>
- [27] Thunder Said Energy, "Drone Inspection Costs?" *Thunder Said Energy*, [s. a.]. Online: <https://thundersaidenergy.com/downloads/inspection-costs-drones-versus-traditional-quality-control/>

Drónok alkalmazása a villamos energetikában

A drónok vagy más néven személyzet nélküli eVTOL légi járművek, az elmúlt években jelentős fejlődésen mentek keresztül, és egyre szélesebb körben találunk alkalmazást a különböző iparágakban. Ez alól a villamos energetikai szektor sem kivétel, ahol a drónok innovatív megoldásokat kínálnak a hagyományos módszerekhez képest. A dróntechnológia bevezetése a villamosenergia-iparba radikálisan átalakította az üzemeltetési módszereket, jelentősen csökkentve a hagyományos ellenőrzési technikákhoz köthető magas költségeket és kockázatokat. A drónok mára elengedhetetlen eszközökké váltak az olyan kritikus energia-infrastruktúra elemeinek, mint például a távvezetékek, szélerőművek és napelemparkok rendszeres ellenőrzésének.

Kulcsszavak: eVTOL, drón, villamos hálózat, naperőmű, szélturbina, elektromos energia

Terpez Gábor, MSc egyetemi tanársegéd Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék terpez.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837	Gábor Terpez, MSc Assistant Lecturer Óbuda University Faculty of Instrumentation and Automation Institute of Electronics and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation terpez.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837
Schuster György, PhD egyetemi docens Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670	György Schuster, PhD Assistant Professor Óbuda University Faculty of Instrumentation and Automation Institute of Electronics and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670

Mhd Bashar Al Kazzaz, Árpád Veress

CFD Analysis of the Combustion Process Evolved in the TKT-1 Academic Jet Engine

Combustion is a complicated process induced by a chemical reaction in which fuel combines with the oxidiser, usually oxygen already in the air to generate heat. Investigating combustion is important for increasing energy efficiency and a key component for further greener solutions and cleaner developments. With the help of CFD modelling, clearer visualisation and a better comprehension of thermal properties can be revealed. Understanding those specific thermal properties will allow the accurate and efficient comparison between different types of fuels. Hence, this paper aims to model the combustion in a TKT-1 research turbine engine using fossil standard fuels and collect the combustion emissions parameters to be able to conduct a correct comparison to the same process when sustainable fuels (SAFs) are used.

Keywords: *CFD analysis, combustion simulation, combustion chamber outlet gas emissions, TKT-1 combustion chamber modelling, fossil fuel, sustainable fuel*

1. Introduction

The constant progress and development in the aviation sector have shaped this industry's futuristic needs and goals. Since all eyes are focused on greener and more environmental-friendly solutions, one cannot neglect the effect of aviation propulsion systems' emissions, especially in the case of jet fuel engines. According to recent studies, the emissions exhausted from the jet engine contain large amounts of nano-sized particles, which are capable of reaching the lower airways upon inhalation [1].

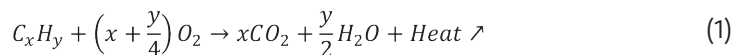
This increasing need to lower the negative effects of such engines has opened the door for countless studies and investigations in the field of sustainability. The real focus was on delivering the best of jet engines efficiency-wise while reducing greenhouse effects as much as possible. While the final aim of the scientific world is to reach a 100% clean energy source for fueling jet engines, one can easily say that it is still relatively far away from that aim, and it will be unreasonable and uneconomical to scrap and/or modify all already manufactured aircraft and engine configurations to achieve that particular end goal. Hence, new research has emerged to accommodate the old configurations and decrease the negative impact of jet fuel engines by introducing Sustainable Aviation Fuels (SAF). The key point is to mix an adequate amount of SAF fuels with Jet-A fuels to reduce emissions but at the same time keep high thrust reliability and availability.

However, knowing the optimal mixing proportions between the Jet-A and the SAF fuels is only possible if the thermal properties of the combustion process and the turbine gas inlet emissions are accurately measured and collected for the sake of proper academic comparison. Therefore, in this paper, those properties will be collected by using Computational Fluid Dynamics (CFD) tools to perform virtual tests on a TKT-1 academic turbojet engine combustion chamber operation in a precise way. Despite the widespread use of CFD in gas turbine simulations, academic turbojets like the TKT-1 provide unique challenges due to their small size and fast rotating speeds, necessitating careful model selection and validation. Previous research on bigger gas turbines has laid the groundwork for combustion and emission modelling, but few have addressed the unique characteristics of small-scale engines. The current study seeks to address this gap by using CFD techniques to investigate the combustion process and gas emissions in the TKT-1 engine under a variety of operational situations to give insights into enhancing the performance and environmental effect of academic turbojets by analysing the exhaust parameters.

2. Combustion process

Combustion is a complicated chemical reaction in which a fuel combines with the oxidiser, usually oxygen existing in the air, to generate heat. Understanding combustion is important for increasing energy efficiency and lowering environmental impact.

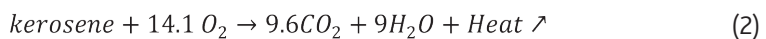
The general chemical formula for a hydrocarbon combustion process [2]:



Some previous researchers have been able to model the combustion process of different jet fuels to predict the emission performance of the fuels. However, due to the high complexity of the composition of the jet fuels, many authors have chosen a more simplified approach. Jet fuel is modelled by using what is known as surrogate fuel, which has a more simplified composition in comparison to the real fuel, i.e. fewer components. The advantage of surrogate fuels is that the combustion characteristics of the real fuel can be modelled in a satisfying way using a simplified mixture of fuels [3], in our CFD simulation to reduce the complexity of the complicated mixture of hydrocarbons, kerosene (Jet A) has been defined in the CFX-RIF tool with only two components [4], [5], [6]:

- 60% $C_{10}H_{22}$ (n-alkanes, iso-alkanes)
- 40% C_9H_{12} (aromatic)

Based on Equation (1), the total amount of the required O_2 for kerosene is:



According to the CFX-RIF tool, the default O_2 percentage is 23.3% in the air. We can calculate the optimum theoretical fuel/air ratio based on the previous formula.

2.1. Flame types

To select the best combustion model in CFX, it is important to understand the flame types which can be classified into three main categories [7] based on the pure fuel and pure oxidiser entering the combustion zone as illustrated in Figure 1. The characteristics of each flame type are highlighted in Table 1. The first characteristic is the non-premixed flames, the fuel and oxidiser (usually air) are not mixed before they reach the combustion zone, they diffuse together at the combustion zone where the flame forms. The second one is the premixed flames, the fuel and oxidiser are mixed before they reach the combustion zone. And finally, the third is the partially premixed flames, which are intermediate between premixed and non-premixed flames. In these flames, the fuel and oxidiser are mixed partially before they reach the combustion zone, but there is still some degree of mixing occurring at the flame front.

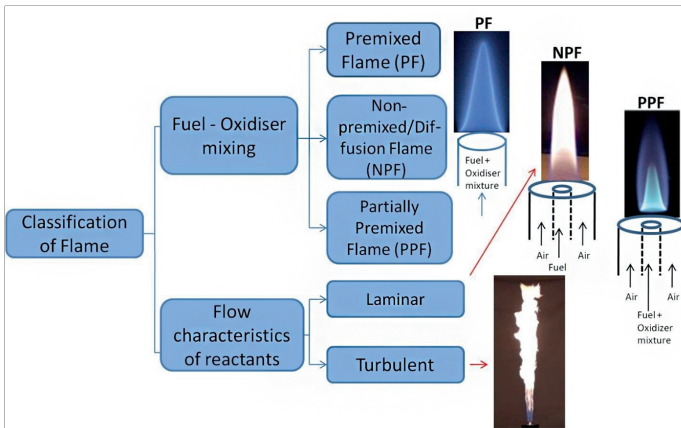


Figure 1. Classification of flame types [8]

Table 1. Comparison of flame types [9]

Flame Type	Fuel/Oxidiser Mixing	Characteristics
Premixed	Mixed before combustion	High efficiency, controlled flame, risk of flashback
Non-Premixed	Mixed at the combustion zone	Diffusion-controlled, inhomogeneous, safer from flashback
Partially Premixed	Partially mixed before and at the combustion zone	Balance of control and safety, variable mixture

2.2. Damköhler number (D_a)

The TKT-1 turbojet engine is equipped with a can-annular combustion chamber containing 4 chambers with 4 fuel nozzles. The flame type in this engine is non-premixed flame because fuel and air are not mixed before they enter the combustion zone. Another factor that must be taken into consideration for selecting the best combustion model in CFX is the Damköhler number.

Combustion depends directly on mixing and chemistry. The ratio of the turbulent mixing time to the chemical reaction time is known as Damköhler Number (D_a) which is a dimensionless number:

$$D_a = \frac{\text{Mixing Time Scale}}{\text{Chemical Time Scale}} \quad (3)$$

If $D_a \gg 1$, the chemical reaction rates are fast, the reaction progress is limited by turbulent mixing. When the $D_a \ll 1$, the chemical reaction rates are slow, the reaction progress is limited by chemical kinetics. In jet engine cases the $D_a \gg 1$ and so the chemical reaction rates are fast [7].

3. CFX combustion models

ANSYS CFX, a Computational Fluid Dynamics (CFD) software provides many combustion models for simulating various combustion processes. Selecting the correct combustion model is determined by the individual application and the nature of the combustion process under investigation [5], [10].

The main available models in ANSYS CFX based on the combustion mode can be Non-Flame Mode or Flame Mode. Eddy Dissipation Model (EDM), Finite Rate Chemistry (FRC) Model, or the Combined Model (EDM + FRC Model) models can be used for the first mode. But for the second mode, the known combustion models are the Pre-mixed/Partially Premixed: Burning Velocity Model (BVM), the Extended Coherent Flame Model (ECFM), or the Probability Density Function (PDF) Flamelet [10], [11].

As it is mentioned in the previous section, the chemical reaction rate is short, so it plays the main role in the reaction progress ($D_a \gg 1$) in the TKT-1 combustion chamber. It is a non-premixed flame, so the most effective model in this case is the Probability Density Function (PDF) Flamelet. The interaction theory is based on the Phase Field Method (PFM) combustion model and turbulence in the flow field. Combustion is thought to occur in thin sheets known as flamelets. The turbulent flame is shown as a collection of laminar flamelets.

To use the PDF flamelet model first, it is required to create the flamelet library for the investigated fuel from detailed kinetic schemes, the flamelet library will be used while running the solver as illustrated in Figure 2. Generating this flamelet library can be done using the "CFX-RIF" tool which was developed by Prof. Peter's group in Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Aachen [11].

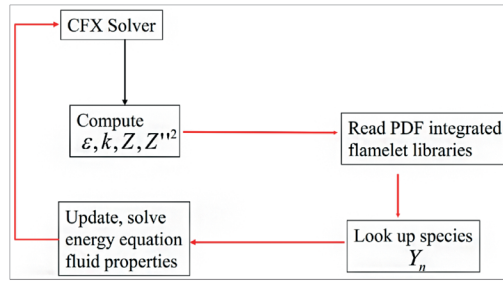


Figure 2. Implementation of PDF Flamelet library in CFX [11]

NO_x is one of the reactive gases that will form nitrous acid on release into the atmosphere. In other words, it is formulated when the fuel is burned in the air at high temperatures. In addition to the previous reaction models, supplementary models are needed for simulating the combustion process in the combustion chamber of turbojet engines in order to model pollutants (NO_x and Soot). These models are: the Thermal NO – thermal decomposition of N_2 , Prompt NO – hydrocarbon radical attack on N_2 , the Fuel Nitrogen – release of fuel-bound N compounds, the Reburn NO – the destruction of NO in fuel-rich flames, and finally the N_2O – alternative thermal NO_x mechanism. However, for the sake of this paper, the thermal formation model will be used to simulate the burning of NO_x [12], [13].

4. CFX simulation process

Before starting the simulation process, it is necessary to understand the can-annular type structure of the typical combustion chamber as shown in Figure 3.

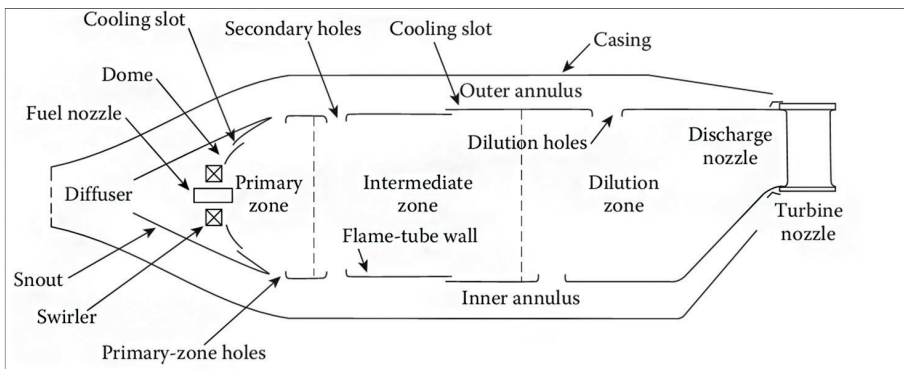


Figure 3. Structure of the typical combustion chamber [14]

TKT-1 academic jet engine combustion chamber is rather unique. The structure of it is presented in the cross-section in Figure 4.

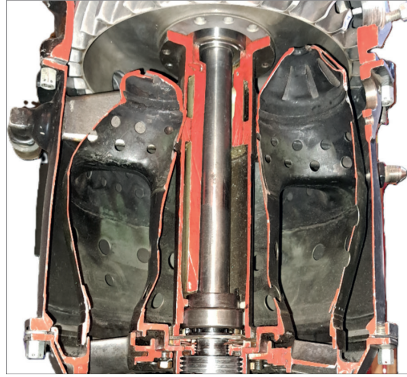


Figure 4.
TKT-1 combustion chamber cross-section [the authors]

To start the simulation process, the geometry needs to be imported and prepared for the modelling process, and then for creating the mesh, only $\frac{1}{4}$ of the combustion chamber geometry was decided to be considered in this study because the combustion chamber has a symmetrical shape allowing the size reduction of the investigated geometry which leads to the ability to use a higher number of cells while ensuring more accurate simulation and a shorter overall calculation time.

The fuel enters the combustion chamber from a 0.8 mm diameter circular surface, thus the finest mesh is used with a 0.01 mm element size. The global volume is meshed with 4 mm large elements and mesh refinement is applied on the specific walls shown in Figure 5. Inflation layers are used with a 2 mm total thickness and 1.1 growth rate. The inflation layer is built up from 10 layers. Furthermore, due to the importance of the primary and intermediate zones of the combustion chamber, three spheres have been defined in front of the fuel nozzle axis the size of whose elements increases with further distance from the nozzle. The final mesh can be seen in Figure 5 which is built up from 28,638,128 elements and contains 7,744,980 nodes.

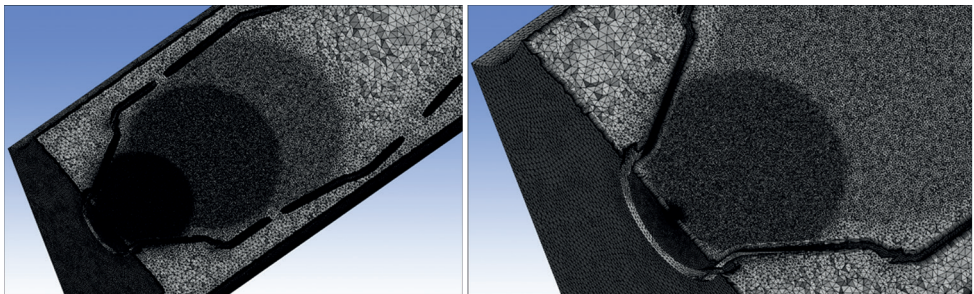


Figure 5.
TKT-1 combustion chamber mesh cells [the authors]

The CFX model needs to simulate the actual combustion process, therefore it was necessary to define the boundary conditions accurately of the built model. Figure 6 shows the conditions used for the boundary conditions and the parameters that form the engine's artificial environment [5], [6]. The set boundary parameters in the below-listed figure are for a full engine thrust level (100%).

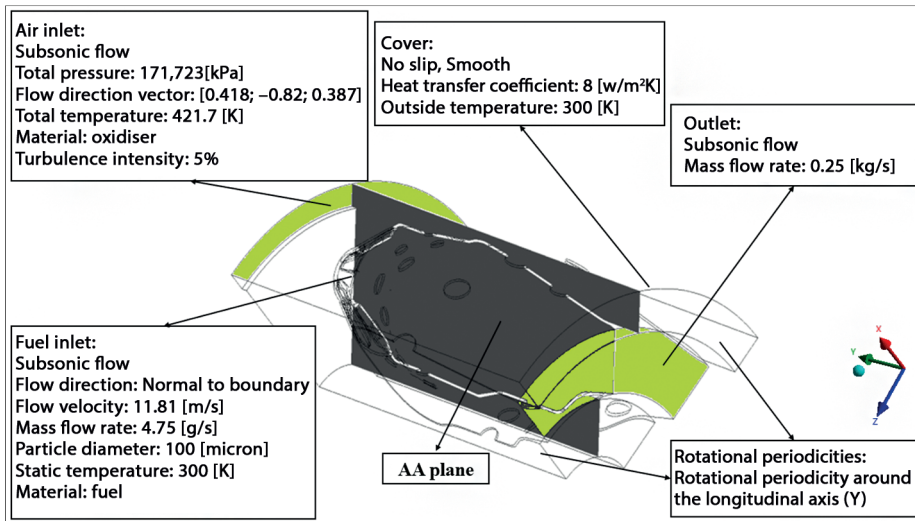


Figure 6.
Boundary conditions for the CFX model [the authors]

The fluid dynamics in the combustion chamber are turbulent and involve heat transfer processes combined with reaction kinetics. The conservation of mass, momentum, and energy equations must be solved numerically in addition to the basic governing equations. In this simulation, the standard k-epsilon turbulence model and the P-1 radiation model are used for further investigation and analysis. Furthermore, a non-premixed combustion model with a PDF mixture fraction approach is applied as stated above, where fuel and oxidiser are introduced separately in the reaction zone [15], [16].

To enhance the simulation accuracy, the High-Resolution advection scheme and the High-Resolution turbulence model discretisation scheme were used. The advection scheme can help minimise the numerical diffusion and ensure precise transport of flow properties such as momentum and energy especially in areas with steep gradients that are subject to shock waves or boundary layer conditions. As for the turbulence model discretisation scheme, it is used because it can predict turbulent behaviour by capturing the complex structure of the flow. Combined together these two schemes can assure the robustness of the solution regardless of the flow conditions [17].

The setting for the liquid phase was the Lagrangian Particle Tracking since it is known for creating an accurate analysis of particle behaviour in a fluid flow. This method tracks individual particles, such as droplets or solid particles, as they move through the flow field,

providing insight into their interactions with the fluid, including drag, collisions, and heat or mass transfer. Unlike Eulerian methods, which treat particles as a continuous phase, Lagrangian tracking follows each particle's trajectory, offering a more precise representation of particle dynamics, and since the flow in this research is a multiphase flow where particles and fluid phases interact, Lagrangian Particle Tracking approach excels in precision to other methods [18].

The Primary Breakup Blob Method, Schiller-Naumann Drag Force, and Ranz-Marshall Heat Transfer models are crucial for simulating droplet behaviour in multiphase flows. The Blob Method simplifies the complex breakup of liquid into droplets, while the Schiller-Naumann model accurately calculates the drag force on particles, determining their movement through the fluid. The Ranz-Marshall model estimates heat transfer between droplets and the gas, helping to predict evaporation or temperature changes in processes like fuel injection. Together, these models provide a comprehensive understanding of spray dynamics [10].

5. CFX simulation results

After creating the appropriate mesh and choosing the most adequate settings, the built model was run through the CFX solver to gather the analysis. The residual and imbalance balance values are within an acceptable level (below 2%) shown in Figure 7, which showcases that all obtained parameters for the study case were reached after 150 iterations. Additionally, as illustrated in Figure 8, a monitor point was set for the outlet average temperature which is inside the range of acceptable values after 150 iterations.

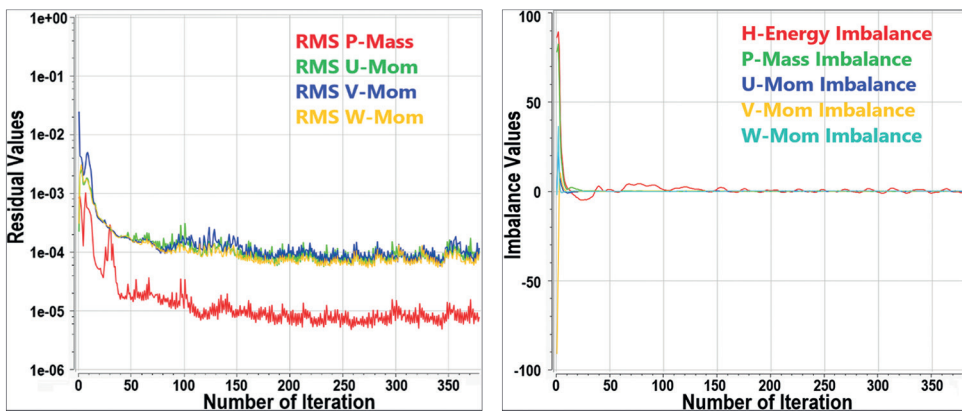


Figure 7.
Residual values (left) and imbalance values (right) [the authors]

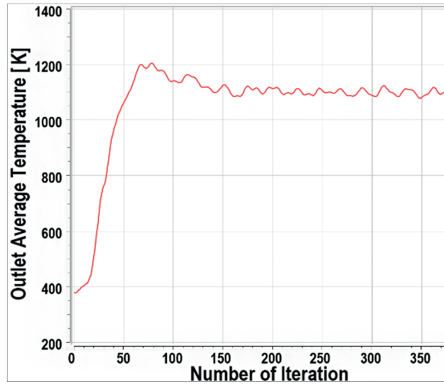


Figure 8.

Outlet average temperature [K] [the authors]

Figure 9 displays the temperature distribution on AA and outlet planes, and the combustion chamber outlet average temperature is 1135.3 [K]. This temperature will be used in future research for comparison reasons with the utilisation of SAF fuels.

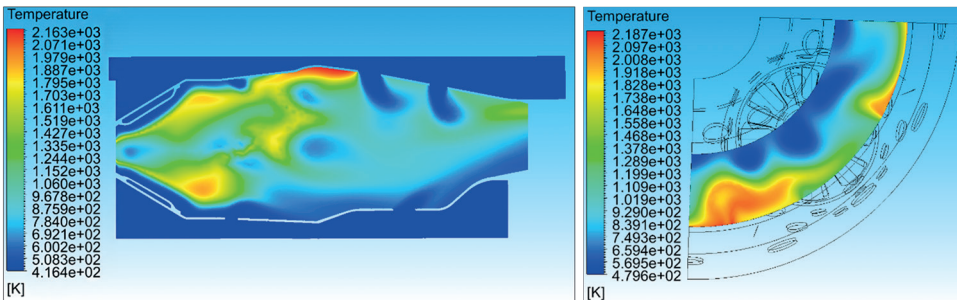


Figure 9.

Temperature distribution: AA plane (left), outlet plane (right) [the authors]

Figure 10 illustrates the total pressure distribution on the AA plane. From these results and based on the function calculator in CFD-POST, the total pressure decreased from the inlet to the discharge nozzle (turbine nozzle) by 5.19%, which can be calculated from the pressure recovery factor equation for the combustion chamber (r_{cc}):

$$r_{cc} = \frac{\text{average total pressure at outlet}}{\text{average total pressure at inlet}} = \frac{257.32 \text{ [kPa]}}{271.42 \text{ [kPa]}} = 0.948 \quad (4)$$

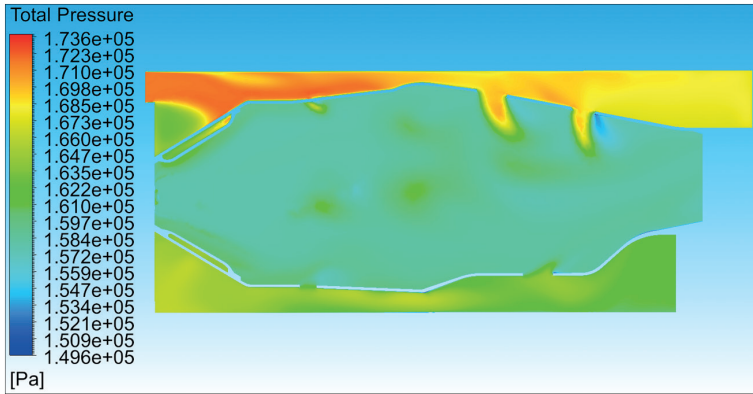
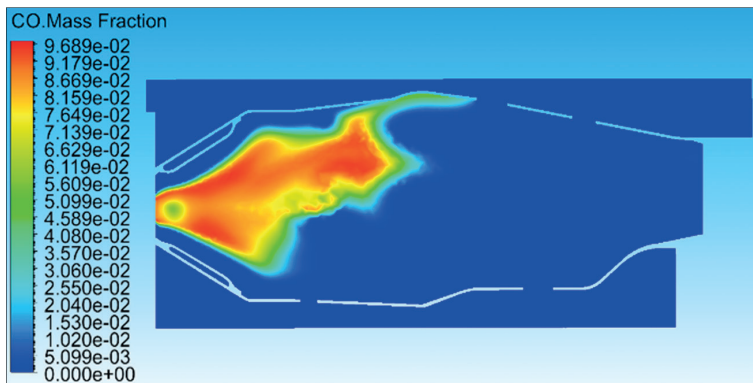
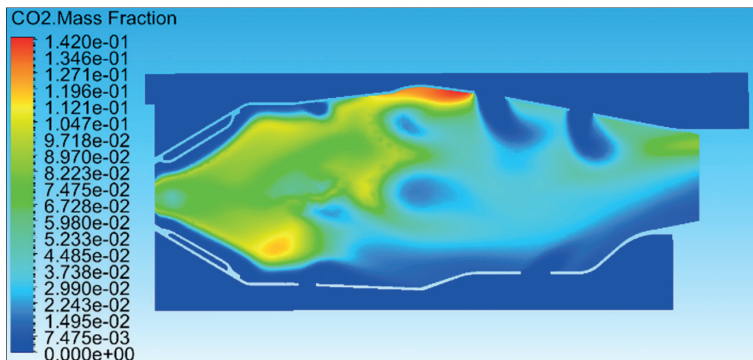


Figure 10.
Total pressure distribution [the authors]

Figure 11 demonstrates the distribution of the gases which are CO_2 , CO , and O_2 . These gases especially at the exhaust are one of the main and critical components to be taken as a reference for future research because of the impact of these gases on the environment and air quality.



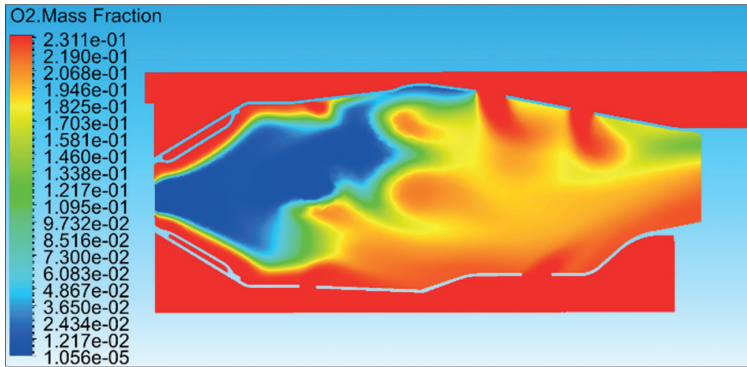


Figure 11.
Combustion gases emission distribution [the authors]

Thermal NO_x accounts for over 80% of all NO_x , therefore a thermal NO_x prediction is a good initial indicator of whether there are any major emission concerns with the design [19]. And as shown in Figure 12, the thermal NO_x follows the high temperatures.

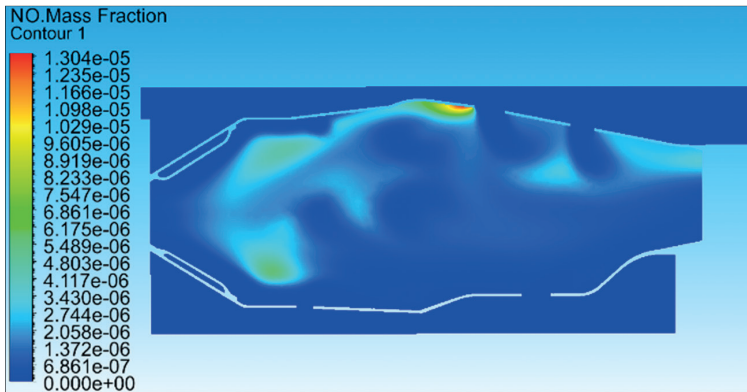


Figure 12.
Thermal NO_x prediction [the authors]

According to Table 2 the pressure recovery factor and averaged outlet temperature are slightly different than the previous study despite the fact that all boundary conditions are nearly the same. The differences are negligible. Most probably the reason is the different cell sizes and configurations where smaller element sizes were used in this study for a higher resolution mesh.

Table 2.
Comparison for verification [the authors]

	Parameters from this study [the authors]	Parameters from [5]
Pressure recovery factor	0.948	0.947
Averaged outlet temperature	1135.3 [K]	1136.97 [K]
Number of mesh elements	28,638,128	7,503,619

Conclusion

This paper presented a detailed Computational Fluid Dynamics (CFD) case study and analysis of the combustion process and gas emissions in the TKT-1 academic turbojet engine, with a focus on understanding the internal fluid dynamics, temperature distribution, pressure recovery factor, and distribution of the gases, which are O₂, CO, CO₂, and NO_x. The results of this investigation give significant insight into both the thermodynamic performance of the engine and its environmental footprint.

The temperature and total pressure distribution were highlighted. Since the turbine distribution parameters are critical not only for engine efficiency but also for the airworthiness of the turbine components, any new SAF mixture and green solution must obtain the same characteristics with the only difference being the ratios of the combustion chamber gases.

The results of this simulation are going to be a key component in further investigation and research by comparing the same parameters with the ones obtained by using different samples and mixture rates of SAF.

In conclusion, this investigation with the help of CFD modelling will play a leading role in advancing the optimisation of SAF mixtures when used in turbojet engines like the TKT-1. By providing detailed insights into the combustion process, temperature distribution, and gas emissions, the findings of this research contribute to ongoing efforts to improve the efficiency and environmental performance of jet engines. With continued advancements in computational methods and experimental validation, there is great potential for achieving cleaner, more efficient systems that meet the ongoing demands and needs of the modern aviation society and aeronautical developments.

References

- [1] K. M. Bendtsen, E. Bengtson, A. T. Saber, and U. Vogel, "A Review of Health Effects Associated with Exposure to Jet Engine Emissions In and Around Airports," *Environmental Health*, Vol. 20, No. 1, 2021. Online: <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00690-y>
- [2] B. Desmet, *Thermodynamics of Heat Engines*. John Wiley & Sons, 2022. Online: <https://doi.org/10.1002/9781394188192>
- [3] R. Bering and K. Buskov, *Numerical Investigation of the Soot Initiated Formation of Ultra Fine Particles in a Jet Turbine Engine Using Conventional Jet Fuel*. Aalborg University, 2012. Online: https://vbn.aau.dk/ws/files/63474400/Rapportasmusk_re.pdf
- [4] M. Hajivand, *CFD Modeling of Kerosene Combustion with Various Initial Conditions and Fuel Droplet Diameters*. Online: <https://www.academia.edu/45054347>

- [5] M. Venczel, G. Bicsák, and Á. Veress, "Coupled Fluid Dynamic and Heat Transfer Analysis of a Small-Sized Research Gas Turbine Combustion Chamber," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 29, No. 2, pp. 167–190, 2017.
- [6] Z. Foroozan and Á. Veress, "Aerodynamic Redesign and Analysis of a Research Jet Engine – Virtual Prototyping of Gas Turbine Components," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 29, No. 2, pp. 309–330, 2017.
- [7] ANSYS, Inc., *CFX Combust Radiation Release 19.0 L01 Intro*. 2020.
- [8] Virtual Combustion and Atomization Laboratory IIT Kanpur, "Classification of Flame Types," *IITK*, [s. a.]. Online: https://home.iitk.ac.in/~mishra/virtual_lab/documentor/introduction4.html
- [9] N. Peters, *Fifteen Lectures on Laminar and Turbulent Combustion*. RWHT Aachen, 1992. Online: <https://www.itv.rwth-aachen.de/fileadmin/Downloads/Summerschools/SummerSchool.pdf>
- [10] ANSYS, Inc., *Ansys CFX-Solver Theory Guide*. 2021. Online: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/CFX/Ansys_CFX-Solver_Theory_Guide.pdf
- [11] ANSYS, Inc., *CFX Combust Radiation Release 19.0 L03 PDF Flamelet*. 2018.
- [12] ANSYS, Inc., *CFX Combust Radiation Release 19.0 L05 Pollutants*. 2020.
- [13] K. Beneda and P. Balajti, "Experimental Study on the Effect of Water Injection on a Micro Turbojet Engine," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 33, No. 3, pp. 97–109. 2021. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2021.3.8>
- [14] L. Moreno-Pacheco et al., "Design and Numerical Analysis of an Annular Combustion Chamber," *Fluids*, Vol. 9, No. 7, 2024. Online: <https://doi.org/10.3390/fluids9070161>
- [15] S. Candel, D. Durox, and T. Schuller, *Combustion Dynamics Lecture 1a*. Université Paris-Saclay, 2019. Online: https://cefc.princeton.edu/sites/g/files/toruqf1071/files/2019-1a-comb-dynintrouction_compressed.pdf
- [16] S. Bhele, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Combustion Chamber Using Biodiesel," *ICTEA: International Conference on Thermal Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–3, 2019. Online: <https://journals.library.torontomu.ca/index.php/ictea/article/view/1202>
- [17] T. Zirwes et al., "Quasi-DNS Dataset of a Piloted Flame with Inhomogeneous Inlet Conditions," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 104, No. 4, pp. 997–1027, 2020. Online: <https://doi.org/10.1007/s10494-019-00081-5>
- [18] Z. Zhang and Q. Chen, "Comparison of the Eulerian and Lagrangian Methods for Predicting Particle Transport in Enclosed Spaces," *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 25, pp. 5236–5248, 2007. Online: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.086>
- [19] ANSYS, Inc., *CFX Combust Radiation Release 19.0 L09 Liquid Spray Combustion*. 2020.

A TKT-1 tudományos sugárhajtóműben kialakult égési folyamat CFD-elemzése

Az égés bonyolult, kémiai reakció által kiváltott folyamat, amelyben a tüzelőanyag a levegőben lévő oxidálószerrel, általában oxigénnel egyesülve hőt termel. Az égés vizsgálata fontos az energiahatékonyság növelése szempontjából, és kulcsfontosságú eleme a további zöldebb megoldásoknak és környezetbarátabb fejlesztéseknek. A CFD-modellezés segítségével világosabb vizualizáció és a termikus tulajdonságok jobb megértése tárható fel. Ezeknek a speciális termikus

tulajdonságoknak a megértése lehetővé teszi a különböző tüzelőanyag-típusok pontos és hatékony összehasonlítását. E cikk célja, hogy modellezze az égést egy TKT-1 kísérleti gázturbinás hajtóműben fosszilis szabványos tüzelőanyagokkal, és összegyűjtse az égési kibocsátási paramétereket, hogy megfelelő összehasonlítást tudjon végezni ugyanezzel a folyamattal fenntartható tüzelőanyagok alkalmazása esetén.

Kulcsszavak: *CFD-vizsgálat, égésszimuláció, égéstér-gázkibocsátás, TKT-1 égéstér-modellezés, fosszilis tüzelőanyag, fenntartható tüzelőanyag*

Mhd Bashar Al Kazzaz, MSc doktori hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék balkazzaz@edu.bme.hu orcid.org/0009-0001-9203-4595	Mhd Bashar Al Kazzaz, MSc PhD student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation and Vehicle Engineering Department of Aeronautics and Naval Architecture balkazzaz@edu.bme.hu orcid.org/0009-0001-9203-4595
Veress Árpád, PhD egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék veress.arpad@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494	Árpád Veress, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation and Vehicle Engineering Department of Aeronautics and Naval Architecture veress.arpad@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494

Zsolt Lucz

Courage as a Virtue in the History of Military Pilots

Virtues that are important to societies and that can come to the foreground in our everyday lives and define us – such as courage, honour, and loyalty – have been of outstanding importance both in the past and in the present, where they are considered fundamental and essential virtues for the practice of the military profession. Nowadays, although honour and loyalty can be influenced, courage is based on the personality of the individual, a quality that can be learned and developed. It is an indispensable element of the military career, as our greatest historical role models also achieved military successes thanks to this virtue.

Keywords: *virtue, courage, pilot, helicopter, instinct, ability*

1. Introduction

Courage – in a more general sense – is the initiative required for someone to start and carry out an action. In the absence of courage, our ability to act decreases, and in some cases, it can increase to complete incapacity. Military courage is a special and unique virtue because it involves high risk, since the chance that the individual will die or be seriously injured is significantly higher. A dangerous situation causes fear and if this prevails, we speak of cowardice, but the lack of cowardice is not the same as courage. On the other hand, a person who is unaware of the danger of a situation is reckless, so it is between courage, cowardice and recklessness. We can also talk about the definition of natural courage, which is a response to a seriously dangerous situation, both instinctive and conscious, to deal with the danger. However, if we consider that this ability can be developed (artificial courage), then its central elements are learning, obedience and discipline. The acquisition of all virtues is based on some sort of learning. Before learning, various dangerous situations arouse fear in a person, by getting to know them and reacting to them, the fear disappears, and one can learn when to be afraid and when not to be afraid. Patriotism is a positive emotion directed towards the homeland with moral value, which not only justifies, but also motivates the performance of certain actions. In the case of courage related to this virtue, although the brave person may react to the situation with serious fear, the protection of moral goals encourages him to perform brave actions [2], [3], [4].

The battles and wars of human history, expressed in the time interval of our existence, were mostly characterised by land clashes, air force and air battles are a mere fraction of this period. Thus, the concept of courage was also linked to the character of such heroes, determined and unshakable people. Determination and willingness to act were rewarded

with orders or decorations in almost all armed forces without exception, but it is important to note that the spiritual mentality of the individual was never developed due to the desire to accumulate medals. An extremely good illustrative example of this is one of the heroes of World War II who received the Medal of Honor, although he never held a gun in his hand. Desmond Thomas Doss (7 February 1919 – 23 March 2006) although he received a military deferment when the United States entered World War II, he still chose to join the army. He later said, "I felt it was an honor to serve my country as my conscience dictated" [1]. Despite his strong religious beliefs, he wanted to be a conscientious co-operator rather than a conscientious objector, so he requested a transfer to the front. Doss served in the 307th Infantry Regiment of the 77th Infantry Division, where he was subjected to much ridicule and abuse for his refusal to bear arms. Despite this, during the fierce fighting in Okinawa that began on 29 April 1945, he rescued an estimated 75 people on the first day from heavy machine gun and artillery fire. But he also performed many other acts of heroism during the war that earned him the distinction of being one of the few people to receive a medal from the White House (Figure 1) [1], [6].

In my opinion, this is the ultimate manifestation of natural, instinctive courage. Faith was a bulwark for him that helped him overcome his mental barriers to the extent that he was able to put his survival instinct aside in order to protect the safety of others. If we consider that despite the continuous emotional attacks from his platoon mates and commanders, he persevered with his ideals, he can be called an even more heroic and courageous person.



Figure 1.

Desmond Thomas Doss, the unarmed soldier, shaking hands with President Harry S. Truman [1]

The courage that emerged with the advent of the air force is a quality that is made quite special by the ability to make responsible decisions, quickly assess the situation and manage stress. Pilots are most often faced with situations where they have to make quick and accurate decisions, so they carry a great deal of responsibility on their shoulders. While a civilian pilot is responsible for the lives of his passengers, a military pilot is responsible for the lives of himself and his comrades, as well as for the plane, so that they return safely from a mission or task. Military pilots also have to deal with the unknown. In certain situations, when operations have to be carried out in unsecured areas at extreme speeds, close to the ground or with hair-raising manoeuvres, it also means that they have to be brave in expanding and pushing their own limits. One of the foundations of their faith is their calmness. In order to make the right decision, they have to remain calm and clear-sighted. These skills could have been learned and developed through various training courses, but they could also have been due to their inner strength and individual, unique attitude.

2. From the early flights to World War II

The experimenters and pilots who carried out the first flights were among the bravest, as they truly faced the unknown. Without them, the world of aviation would not be where it is today. When aviation technology was developing, engineers and developers did not have prior experience, studies or pilots with thousands of hours of flight time; they could only rely on their own ideas. This made it difficult in many cases to find candidates who were willing to face even death for the sake of the development of science. The first combat use of aircraft took place in the Italo–Turkish War in 1911. These missions showed that aircraft could be suitable for combat use, so the tactical development of aircraft increased dramatically thereafter.

In World War I, the air also became a battlefield. Between 1914 and 1918, aviation developed rapidly, and by the end of the war, the air force emerged as a separate branch of the armed forces. At first, airplanes only performed reconnaissance tasks, but they soon realised that ground troops were defenceless from above, and taking advantage of this, the crews of the planes began to use bombs and hand grenades against them. The first air battle took place on 4 October 1914. A French pilot shot down a German plane with his handgun, after which the development of airborne weapons gained new momentum. The weapons were first mounted on the wings, but their designs were not optimal and effective enough. Later, they were mounted above the engine, so they could achieve more effective fire control. The development of air combat was made possible and effective by the intermittently controlled machine gun designed by the Dutch designer Fokker, which allowed the machine gun mounted on the engine cowling to work well even with a rotating propeller and to allow proper aiming. During World War I, aviation progressed by leaps and bounds. Engine power increased from 60–80 hp to 280–300 hp, flight speed from 80 km/h to 220 km/h, maximum altitude from 2000 m to 4000–7000 m, range from 40 km to 200–800 km, and bomb load from zero to 700–1000 kg [11], [12].



Figure 2.

József Kiss Ittebei, one of the most successful Hungarian ace pilots, nicknamed the "knight of the air" [9]

Over time, a class of flying aces emerged, they were the pilots who won the most air battles. According to popular belief, the purity and chivalrous nature of air combat contrasted with the battles fought in the trenches, which mostly disregarded honour (Figure 2) [9].

In reality, however, it is more nuanced than that, as the air battles were also cruel, merciless and, leaving aside chivalry, they did everything they could to win. Most of the "aces" hunted down lone scouts or novice pilots. It can be said that the pilots of World War I were brave, even if some of them only hunted novice pilots. More than once, they were forced to carry out several missions a day, even if their planes were damaged. Their courage is proven by the fact that they most often went into the unknown, working with dangerous and undeveloped technology in an even more dangerous environment waiting to be discovered. They could never be sure whether they would return after the fight.

The years after World War I were not favourable for either the pilot or the aircraft production. The market had no takers, it was choked, the previous production volume became redundant. In the first year after the war, the production volume in the USA fell to 328 units, many companies in Europe went bankrupt. The victorious powers introduced a flight ban throughout Hungary. Only a fraction of the pilots remained in military service and an even smaller part of them remained in aviation. One of the greatest achievements was the flight around the world in 1924. Among the flying heroes was the first female pilot, who flew across the Atlantic Ocean in 1932 in 15 hours. During this period, a high degree of courage in flight was also necessary, since now it was not the fighting that caused difficulties in many cases, but the poor instrumentation. The pilots "flew with their bottoms", instinctively keeping the plane balanced, and although a rudimentary artificial horizon was already on board, many did not yet trust it, and as a result, many fatal accidents occurred.

In World War II, the air force had already played a decisive role, and the skies were once again the domain of the brave. They carried out their operations with more modern weapons, more sophisticated flying techniques and flight procedures, but air defence had also developed a lot over the years. Airplanes were also introduced to new tasks, landing operations appeared, where pilots were put under extra pressure to be responsible for more people and needed even more courage, mainly due to the modernised air defence, as they most often flew behind enemy lines and carried out their tasks.

It can be seen that the work of war pilots required a lot of extra qualities, courage, perseverance, tolerance for monotony, a high degree of concentration and an outstanding sense of responsibility. In addition, up to now, instinct was the determining factor, not the checklists of the given types. There was no time to consider, the experience, daring and intuition of the individual were the only guiding factors [5].

3. From the Cold War to the regime change

The post-war period was largely dominated by Soviet ideology, reflecting the broader geopolitical environment and influence of the time. Soldiers were expected to embody and profess virtues aligned with the communist ideology, such as discipline, loyalty, and commitment to the state and party. This gave rise to the concept of “communist autonomy”, which highlighted a disciplined and ideologically driven approach to military service. This emphasised not only obedience, but a deeper ideological acceptance of the principles of socialism. Its aim was to foster a sense of collective consciousness in soldiers, relegating the individual to the background.

Collective, team thinking has always been important to pilots, since (similarly to many other branches of arms) the effectiveness of the missions was largely determined by how much the reconnaissance, fighter and bomber teams could trust each other during the offensive. Although Eastern technology lagged behind its Western counterparts, the new direction to follow tended towards learning the development of aircraft. More precise and accurate radars, weapons and instruments appeared one after another, so the pilots also had to constantly adapt. The Hungarian aircraft fleet was experiencing its golden age at that time. In the rotary-wing line, for example, from the 1980s onwards, there were 40 Mi-24D and Mi-24V attack helicopters and nearly 70 Mi-8 transport helicopters. We can witness a fleet of similar size today thanks to the Zrínyi 2026 defence and military development programme [7], [8], [10].

It is important to note that many pilots – who graduated in the Soviet Union during this period – are still active today and are serving with the best of their knowledge. The sense of responsibility, commitment and passion they have for their careers are so outstanding that advanced technology alone would not be enough without them. This seems to be reflected in the training of the new generation. The knowledge base, selfless helpfulness and the highest level of courage that these pilots show are difficult to teach and transfer to today's youth, and this is partly due to their upbringing, training, and the ideas and perceptions of that time. Pilot courage and camaraderie were able to take root so deeply that time could not erode them. There were no mobile phones, no social media, only mutual respect and learning from each other. Only in this way could they develop such a level of courage, heroism and self-confidence that helped them through everything. They trusted each other and their plane. Although the technological development of the time was advancing rapidly, there were still no life-saving devices that could be considered 100% certain. While during the great wars, although life-saving devices were present, the most common outcome was death (courage here meant heroic death), the appearance of more advanced devices in the period close to the regime change perhaps put them in a new light. The pilots were trying to save the plane and the crew until the penultimate moment (they were not driven by further destruction of the enemy or glory) and for this reason it may have required even more determination to hold out until the final moment, before the situation became unmanageable.

4. Moral issues of our day

After the change of regime, a strong stagnation was noticeable in the domestic pilot training. Universal pilot training ceased, and was replaced by external and internal recruits.¹ These candidates were recruited into the Air Force within the framework of the NFTC programme and began their training. However, just as the training system, the mentality, attitude and commitment of the emerging generations have also taken a new turn. Generation Y (born between 1984–1994) and the first quarter of Generation Z (born between 1995–2009) can be said to be young people who have not yet fully fallen victim to the digital world. As they say, the world is constantly changing and everyone must adapt to this, otherwise there is a risk of social exclusion. As digitalisation gained ground, new and new professions and fields of expertise emerged, and this in itself brought the opportunity for young people not to have to choose a lifelong profession and live in a rut, but to be able to change and move around the world at any time. For this very reason, the current generation's commitment to a chosen profession has significantly decreased. In contrast to the patriotism and determination of the old days, where the soldier (be it land or air force) chose the defence forces as a lifelong profession and built his own career throughout his life, in today's fast-paced world, learning a new profession no longer takes an entire career, but only a few months or years, so the idea of changing careers is not so terrifying. For this reason, courage as a trait can no longer be interpreted in the same way as it used to be. In the 21st century, courage, in my opinion, can be defined as a kind of perseverance to realise the dreams we have conceived and not be deterred by obstacles.

In terms of navigation, the new types arriving with the modernisation of the military forces can give a favourable direction to the pilots of the future, so that they too can embody this courage. It must be stated that society is moving towards technologies based on virtual reality, so the image of the modern defence forces can also be completed by applying these technologies. The new types meet these requirements, so they can be attractive to those who are about to choose a career. However, this requires an upbringing very early, right from childhood, where the supporting background is ensured along with perseverance in the chosen career path.

In addition, various simulators can greatly enhance the courage that can be learned and developed. In terms of education, there are many options available at home, such as the Digital Combat Simulator or Microsoft Flight Simulator.² Pairing software with VR technology can result in a level of skill improvement that was previously unimaginable. Not only in terms of flight skills, but also in terms of stress management or the ability to act. Let us think about the reaction time in certain dangerous situations, when you need to recognise the seriousness of the situation or simply cope with the stress of performing under intense pressure. In practice, some of the scenarios listed here will also be successfully implemented by applying the individual's learned courage, because today's modern machines do not require immediate action ("First reaction, no reaction" principle³), but rather the sequence of actions expected by the manufacturer (or operator) must be followed. These are called checklists, which can

¹ NATO Flying Training in Canada.

² Virtual Reality.

³ First reaction, no reaction principle: The first reaction is to not react (to rush) and remain calm.

be practiced perfectly in a simulator. In this way, a subconscious sense of security develops in modern pilots and, at the right time and in the right situation, they will act as they have been instructed and as they have learned. Their courage can therefore be interpreted as a conscious resistance to immediate haste and the preservation of composure in a risky situation.

5. Summary

Ultimately, it can be stated that the definition and meaning of human qualities largely depend on the spirit of the era, technological development and geopolitical situation. On a military level, the great wars and battles of the eras have placed certain character traits in different approaches and judgments, so it cannot be said that courage, determination or even recklessness must mean the same thing in every era. This is also true for the 21st century, where it is important to rethink these adjectives. It is important to note that this change will continue in the future, so they will have to be reinterpreted from time to time. In this way, perhaps a kind of change in perception can be brought about not only on a military level, but also socially, which will put certain human qualities in a new light.

References

- [1] B. Herndon, *The Unlikeliest Hero: The Story of Desmond T. Doss*. Oakland, Pacific Press, 1967.
- [2] Boda M., *A katonai erények: Hadtörténelmi példákkal szemléltetett katonai etikai elmélet*. Budapest, Ludovika, 2021.
- [3] Boda M., *A katonai erények története*. Budapest, Ludovika, 2023.
- [4] Boda M., "Bátorság és távolság," *Hadtudomány*, Vol. 26, Special Issue, pp. 44–58, 2016. Online: <https://doi.org/10.17047/hadtud.2016.26.K.44>
- [5] Boda M., "A fegyvertechnológia fejlődésének hatása a háború természetére és a bátorság erényére," *Honvédségi Szemle*, Vol. 152, No. 3, pp. 113–125, 2024. Online: <https://doi.org/10.35926/HSZ.2024.3.9>
- [6] Library of Virginia, *Dictionary of Virginia Biography*. [s. a.]. Online: https://www.lva.virginia.gov/public/dvb/bio.asp?b=Doss_Desmond_Thomas
- [7] Kenyeres D., "Helikopterek a magyar haderőben," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 17, Special Issue, pp. 1–5, 2005. Online: https://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/kenyeres_denes.pdf
- [8] Győri J., *A magyar katonai repülés kronológiája 1945–2008*. Budapest, Zrínyi, 2016.
- [9] Balatoni K., "A 'levegő lovagja', aki emberségesen küzdött," *Honvédelem.hu*, 28 January 2022. Online: <https://honvedelem.hu/hirek/a-levego-lovagja-aki-embersegesen-kuzdott.html>
- [10] Szabó J., M. Szabó M., *A magyar katonai repülés története 1938–2008*. Budapest, Zrínyi, 2008.

- [11] Czétényi B., "Fejezetek a magyar katonai repülés történetéből," *Historia Nostra*, Vol. 1, No. 1, pp. 24–41, 2019. Online: https://publikacio.uni-eszterhazy.hu/4658/1/24-41_Czetenyi.pdf
- [12] Szegedi Tudományegyetem Könyvtár, *Hadirepülés az I. világháborúban*. [s. a.]. Online: <http://www.bibl.u-szeged.hu/bibl/mil/ww1/technika/repules/index.html>

A bátorság mint erény a katonai pilóták történetében

A társadalmak számára fontos erényeknek, amelyek a mindennapjaink folyamán előtérbe kerülhetnek és meghatározhatnak bennünket – mint a bátorság, a becsület és a hűség – kiemelkedő jelentőségük van a múltban és a jelenben egyaránt, ahol a katonai hivatás gyakorlásához nélkülözhetetlen alapvető erényeknek számítanak. Napjainkban a becsület és a hűség bár befolyásolható, azonban a bátorság az egyén személyiségén alapszik, tanulható és fejleszthető tulajdonság. A katonai pálya elengedhetetlen eleme, hiszen legnagyobb történelmi példaképeink is eme erényüknek köszönhetően értek el hadtörténelmi sikereket.

Kulcsszavak: erény, bátorság, pilóta, helikopter, ösztön, képesség

Lucz Zsolt	Zsolt Lucz
doktori hallgató	PhD student
helikopteroktató tiszt	Helicopter Instructor Officer
MH Kiss József 86. Helikopterandár	Hungarian Defence Forces József Kiss 86 th Helicopter Brigade
Vegyes Kiképző Repülő Század	Mixed Training Flying Squadron
lucz.zsolt96@gmail.com	lucz.zsolt96@gmail.com
orcid.org/0009-0002-9801-8681	orcid.org/0009-0002-9801-8681

Lajos Halmi

The Emergence of Classical Military Virtues in Air Force Teams and Their Modern Assessment Possibilities

Aviation, which plays an indispensable role in our daily lives across the transportation, economic, military, and healthcare sectors, is an exceptionally complex system where the human factor holds a dominant position. The decisions, physical, and mental condition of aviation professionals – such as pilots, flight attendants, and other key personnel – have a direct impact on flight safety. Analysing the works of classical military theorists, we see that while their focus was primarily on strategy and the theory of warfare, numerous parallels can be drawn to the domains of human factors and aviation safety. This provides deeper insights into the mechanisms of decision-making and stress management. Although the relentless advancement of automation and technology has significantly increased the efficiency and safety of aviation, the human factor remains a critical element. The development of modern biomedical and information technology tools has opened new possibilities for real-time monitoring of physiological states during flights, which is essential for reducing aviation safety risks.

Keywords: *military virtues, biometric data analysis, physiological effects, human factors, flight safety, aviation environment, automation, military science*

1. Introduction

Work conducted on aircraft predominantly takes place in environments with reduced or low oxygen levels, posing significant strain on the human body as a whole. Factors such as gravitational forces, occasional hypoxia due to environmental characteristics, reduced atmospheric pressure, extreme durations of workload, and external pressure exertion all contribute to both physical and mental challenges for aviation professionals. These conditions not only affect reaction times, decision-making capabilities, and divided attention of those involved in flight operations, but also pose a direct threat to overall flight safety. The purpose of biomedical monitoring is to enable the timely identification of such issues and provide opportunities for appropriate intervention. Modern portable diagnostic devices and their associated information and communication systems – such as pulse oximeters, blood oxygen monitors, and even EEG equipment – are becoming increasingly widespread. These tools can gather real-time information about physiological conditions, allowing the rapid identification of deviations that signal potential risks. The implementation and use of these systems are not

solely intended to monitor the health of flight personnel but also have a clear and decisive objective: to enhance overall flight safety [1]. To gain the most comprehensive and easily understandable perspective on the studied field, it is essential to look back at the foundations of safety and human strategies rooted in the past. Throughout the history of military science, numerous events and thinkers have laid an excellent scientific foundation for identifying the origins of the key concepts discussed in this study. This article aims to provide an overview of aviation safety and technological issues examined through the lens of classical military values, placing them into a contemporary context. It explores the opportunities provided by technological advancements, current challenges, and future directions that could further enhance flight safety. Understanding the human factor more thoroughly and monitoring it in real-time are key to making aviation even safer in the future.

2. The military roots of human factors and safety

Among the scholars of military science, the works of some thinkers are only indirectly connected to modern aviation safety or human factors. However, the principles and strategies they established have had a profound impact on examining the correlation between human factors and technology. This chapter highlights a select few classics whose ideas can be indirectly linked to the fields of aviation safety and human factors.

Carl von Clausewitz (1780–1831) in his seminal work *On War* emphasises the pivotal role of the human factor. While analysing the unpredictable and chaotic nature of war, he concludes that human will, intuition, and experience significantly shape decision-making and its outcomes. He particularly highlights the decision-making capabilities of commanders and the influence of emotional and psychological factors on the battlefield. This perspective directly applies to modern aviation safety, where aviation professionals must make swift and effective decisions in unconventional situations, such as unexpected technical or organisational challenges, adverse weather conditions, or critical emergencies. Clausewitz introduces the concept of “friction”, a term he uses to describe unforeseen events in military operations. In the aviation environment, this analogy can be applied to the detection and management of human-machine interaction failures, as well as the effects of stress and fatigue. His observation that, under the “fog of war”, military leaders must rely on intuitive judgments is closely aligned with the situational awareness (SA) required of pilots, which is fundamental to ensuring aviation safety [2].

Antoine-Henri Jomini (1779–1869) is renowned for his systematic and logical approach to warfare. His perspective is particularly relevant to modern aviation safety, as the design and operational mechanisms of safety structures rely heavily on thorough analysis, foundational principles, and systematic thinking. One of the core elements of Jomini’s strategy is the concept of “key points” and the concentration of available resources on these critical areas. In aviation safety, this approach is evident in risk management procedures that focus on critical aspects of human factors, such as stress management and fatigue monitoring. Additionally, Jomini emphasised the importance of discipline and well-defined standards, which closely align with modern aviation rules and protocols designed to minimise the potential for human error [3].

Giulio Douhet (1869–1930) focused on the theory of aerial warfare, emphasising the strategic importance of air forces and the reliability of tools used in aerial combat. He was

one of the first strategic thinkers to thoroughly analyse the role and consequences of air warfare. His work is particularly relevant to aviation safety, as he placed significant emphasis on the relationship between aircrew and aircraft. According to Douhet's theory, the training, physical preparedness, and psychological resilience of aircrew are critical factors for success in aerial operations. This directly parallels modern approaches to aviation safety, particularly in relation to human factors. His concept remains highly relevant today, especially concerning the real-time monitoring of the condition of aircrew and aviation professionals. Douhet's emphasis on the reliability of technology and the establishment of conditions for safe operation are fundamental principles in contemporary aviation. He astutely highlighted that the rapid advancement of technology does not diminish the importance of human factors; rather, it increases the significance of effective collaboration between humans and machines [4].

Billy Mitchell (1879–1936), a pioneer in the development of the U.S. Air Force, placed significant emphasis on the combined importance of human and technological factors. Mitchell stressed that the endurance, mental preparedness, and training of flight personnel fundamentally determine the success and safety of aviation operations. He highlighted a principle that remains crucial today: the integration of technology and human factors is essential. According to Mitchell, one of the indispensable elements in preventing aviation incidents and accidents is fostering harmony between personnel and equipment. His ideas are directly related to aviation safety systems, which aim to enhance the efficiency of human-machine cooperation. Mitchell's work anticipated the importance of simultaneously advancing aviation science and human factors, a concept that continues to play a key role in aviation safety today. His vision provided the foundation for modern air traffic management structures and training programmes, which ensure efficient operations by incorporating human factors into their design and implementation [5].

Sun Tzu (ca. 544–496 BCE), in his renowned work *The Art of War*, outlines universally applicable strategic and tactical principles, emphasising preparedness and adaptive flexibility. These principles are not only relevant to warfare but also highly applicable to aviation safety. According to Sun Tzu, the most effective strategy is prevention – assessing situations in advance, emphasising preparation, and adapting to circumstances. This principle aligns seamlessly with aviation safety, where identifying risks and minimising hazards beforehand are critical. The monitoring of human factors, such as tracking the mental and physical condition of pilots, reflects this preventive approach. Additionally, Sun Tzu highlights the importance of leadership and teamwork, which are indispensable in the collaborative efforts of aviation professionals. In modern aviation, effective communication and cooperation among pilots, flight attendants, engineers, and ground controllers are among the most critical elements for ensuring safety. This principle of coordinated teamwork mirrors Sun Tzu's vision of the harmonious interplay of roles in achieving success [6].

3. Military virtues in aviation

It is essential to examine military virtues – such as decision-making and action-oriented capabilities representing the human dimension – and their significance in the field of aviation, particularly within the air force. The philosophical and practical approaches to these qualities are undoubtedly applicable to modern air force operations, where rapid decision-making,

discipline, and reliability are fundamental requirements. Military virtues are a collection of values and norms historically and culturally defined by the military profession. These are not merely moral categories but also precise guidelines for action that are applied in the conventional activities of defence personnel. In air force units, these virtues manifest in the cooperation between pilots, controllers, and ground personnel, in handling stressful situations, and in fostering harmony between technology and human elements. Discipline, perseverance, and quick situational awareness are especially critical for those working in the air force [7]. This study explores how these capabilities are manifested and whether they can be effectively monitored to enhance aviation safety. The goal is to determine how leveraging these virtues and their practical application can elevate safety standards in aviation operations.

Discipline and precision serve as the cornerstone of air force operations, upheld through strict adherence to established rules and protocols. Discipline ensures that pilots and ground personnel execute their tasks with accuracy, minimising the risk of human error. Discipline is particularly crucial in unforeseen circumstances, such as emergencies, where the swift and composed application of procedures – meticulously practiced over years – is essential to achieve a safe landing.

Aerial operations often involve extreme physical and mental strain, demanding courage and self-control. Aircrew members must be capable of making sound decisions under significant pressure, even when these decisions carry substantial risks depending on the situation. Courage is not synonymous with recklessness; it involves acting correctly and consciously, even with full awareness of the dangers, by making a series of rational decisions based on careful assessment. This approach forms the foundation of effective risk management. Self-control, in a military context, signifies the ability to maintain mental and emotional stability [8]. In air force teams, courage and self-control can be assessed and monitored through stress evaluation tests, simulations, virtual environments, and real-time biomonitoring. Supported by modern technologies, such as pulse monitoring and EEG measurements, the response of personnel to unexpected situations can be tracked effectively.

Military service tests both physical and mental endurance, which is directly linked to the virtue of perseverance. Perseverance must manifest not only in physical stamina but also in mental resilience. In aviation, this is a fundamental trait, as the likelihood of successfully completing tasks diminishes without it. Related to perseverance are adaptability and flexibility. In the rapidly changing aviation environment – such as managing weather conditions or technical challenges – constant adaptability is required to make timely and effective decisions. This ability extends beyond technical expertise, encompassing psychological flexibility, which enables effective handling of stressful situations.

For air force personnel, these qualities can be monitored through long-duration tasks assessing endurance, regular medical evaluations, simulations, and personality tests. Wearable biotechnological devices, such as those measuring heart rate, oxygen saturation, and cortisol levels, facilitate tracking endurance and stress tolerance from a medical perspective.

Leadership and teamwork skills are not only fundamental for air force personnel but also essential across the entire military. In most cases, soldiers work in teams where effective communication and the ability to follow leadership are critical. Ideal leadership ensures that every team member understands their tasks and roles, enabling them to collaborate effectively toward a common goal. Discipline forms the cornerstone of military life, ensuring hierarchical order and adherence to rules. In aviation – whether civilian or military – discipline is equally

a foundational pillar. Obedience, however, does not imply passive subordination but rather informed, active participation in achieving shared objectives [9]. In the air force, the levels of discipline and obedience can be assessed through flight exercises, teamwork evaluations, and protocol adherence checks. Accurate execution of procedures and compliance with instructions are also pivotal in preventing accidents.

Loyalty and commitment manifest in dedication to the community and profession, as well as in perseverance toward shared ideals and objectives. In the air force, loyalty can be measured by the trust and cooperation among team members. The level of teamwork and dedication can be assessed through communication tests between flight crews and ground controllers, as well as post-mission evaluations that gauge the sense of community and commitment. Military traits are evident not only on an individual level but also within organisational culture. However, the rapid advancement of technology introduces new and sometimes unfamiliar challenges to the role of human factors. In human-machine interactions, achieving a balance between human decision-making and technological reliability is crucial. Aircrew members must excel not only in operating aircraft but also in overriding the decisions of autonomous systems when necessary, particularly in critical situations.

4. Examination of military values in the air force

The examination of military values in the air forces is crucial for maintaining military ethics and professional standards, which is not merely an administrative task but rather a complex and dynamic process aimed at preserving and developing the ethical and moral norms of soldiers. These values apply not only to individual soldiers but also to leaders as a shared guideline to follow. Below, I will discuss the significance of military values, the methods of examination, as well as current trends and challenges [10].

Psychological tests and simulations play an extremely important preventive role in the selection and training of military personnel, as they assess decision-making speed, stress tolerance, and the ability to maintain self-control. Simulation exercises, such as emergency drills that model realistic situations, help to map out personnel reactions and the quality of their decisions in critical situations.

The performance of soldiers and pilots is regularly evaluated, considering and incorporating the implementation of the discussed values. This assessment reflects, to some extent, bravery in real situations and discipline in the execution of orders and protocols. The detailed post-training evaluations following flight exercises, simulator training, and tasks, which examine the accuracy and speed of decision-making and actions, are also milestones in evaluating an individual's performance. During debriefing, personnel members receive feedback on their performance and the areas in which they need improvement.

When evaluating the overall performance of soldiers, not only are technical skills assessed, but also the realisation of fundamental virtues arising from organisational characteristics. As a part of training and development programmes, curricula follow a structure aimed at developing military values, such as leadership skills and stress management. Mental health practices and stress management techniques also play an important role in ensuring effective task execution. Additionally, the aim is to raise awareness of the importance of virtues in

everyday service. Examples of such practices include the use of simulators and situational exercises, where realistic scenarios are modeled, requiring pilots to make decisions.

Real-time tracking systems and advanced biotechnological tools, such as wearable sensors that monitor the physiological states of those involved in aviation (heart rate, blood pressure, stress hormone levels), provide real-time feedback on how the individual responds to stress. EEG-based systems allow monitoring of pilots' mental states (e.g. attention, concentration), which directly influences the development of the decision-making chain.

5. Summary

Although the classics of military science primarily studied the aspects of war and strategy, they established principles that are still relevant today in the study of aviation safety and the human factor. The research and ideas of these scholars highlight the importance of human decision-making, stress management, organisation, and prevention, all of which play a key role in handling critical situations – this includes the entire scope of civil and commercial aviation. While they did not directly address aviation safety, their principles have influenced the development of modern flight structures, particularly in understanding the relationship between human factors and technology. Military values such as discipline, courage, flexibility, and leadership skills are not only important from an individual performance perspective, but they also play a pivotal role in the safe and efficient operation of air forces. These virtues can be developed and maintained through training, real-time monitoring, and constant performance evaluation of military personnel. Modern technologies, such as biometric monitoring systems, offer excellent opportunities for real-time tracking and optimisation of human factors, significantly contributing to the enhancement of aviation safety. Principles like courage, discipline, perseverance, and loyalty are not mere abstract concepts; they have practical significance in the daily operations of the air force. These virtues help maintain ethical standards and professional conduct, while modern technologies allow for the objective monitoring of these characteristics. In order to continuously improve aviation safety, it is essential to focus on the targeted development of military virtues and the harmonious integration of technology with human factors. Training programmes and performance evaluation systems for aviation personnel ensure that, alongside technical preparedness, ethical considerations are also prioritised. When responding to new challenges, it is important to adapt ethical norms and integrate current technologies, such as autonomous systems, into everyday operations.

References

- [1] N. J. Napoli, A. Harrivel, A. Raz, Improving Physiological Monitoring Sensor Systems for Pilots. *Aerospace America*, 12 December 2020. Online: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/improving-physiological-monitoring-sensor-systems-for-pilots>
- [2] C. von Clausewitz, *A háborúról*. Budapest, Zrínyi, 1961.
- [3] A-H. de Jomini, *The Art of War: Restored Edition*. Kingston, Legacy Books Press Classics, 2008.
- [4] G. Douhet, *The Command of the Air*. Maxwell, Air University Press, 2019.

- [5] R. G. Miller, *Billy Mitchell "Stormy Petrel of the Air"*. Washington, D.C., Office of Air Force History, 2004.
- [6] Szun-Ce, *A háború művészete*. Budapest, Trubadúr, 2024.
- [7] Boda M., *A katonai erények*. Budapest, Ludovika, 2021.
- [8] Boda M., *A katonai erények története*. Budapest, Ludovika, 2023.
- [9] Bán A., "Katonaerkölcsi értékek érvényesülése a Kratochvíl Károly Honvéd Középiskola és Kollégiumban végzett növendékek életében," *Hadtudomány*, Vol. 30, No. 3, pp. 67–77, 2020. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2020.30.3.67>
- [10] Boda M., "Az alapvető katonai erények mibenléte és helyük a hosszú 19. századi magyar hadtudományos gondolkodásban," *Hadtudomány*, Vol. 28, No. 1, pp. 38–47, 2018. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2018.28.1.38>

A klasszikus katonai erények megjelenése a légierős csapatoknál és azok korszerű vizsgálati lehetőségei

A repülés, amely mindennapjainkban megkerülhetetlen szerepet vállal a közlekedési, gazdasági, hadi és egészségügyi területeken egy rendkívül összetett rendszer, amelyben az emberi tényező domináns szerepet játszik. A repülésben részt vevő szakemberek, mint például a pilóta, a légiutas-kísérő és egyéb területek képviselői döntései, fizikai és mentális kondíciója direkt hatással van a repülésbiztonságra. A hadtudomány klasszikus gondolkodóit is elemezve látjuk, hogy többnyire a stratégia és háborúelmélet aspektusait vizsgálták, de számos ponton párhuzam vonható az emberi tényező és repülésbiztonság területével, amely által részletesebb betekintést nyerünk a döntéshozatal és stresszkezelés mechanizmusába. Jóllehet az automatizáció és a technológia rendületlen fejlődése nagymértékben növelte a repülés hatékonyságát és biztonságát, az emberi tényező továbbra is kiemelkedő helyet foglal el a kritikus elemek palettáján. A korszerű orvosbiológiai és információtechnológiai eszközök fejlődése azonban új kapukat nyitott meg a repülések során vizsgált fiziológiai állapot valós idejű monitorozása területén, amely kulcsfontosságú a repülésbiztonsági kockázatok csökkentésében.

Kulcsszavak: *katonai erények, biometrikus adatelemzés, fiziológiai hatások, emberi tényező, repülésbiztonság, repülési környezet, automatizáció, hadtudomány*

Halmi Lajos
doktori hallgató
Nemzeti Közszerződési Egyetem
Katonai Műszaki Doktori Iskola
halmi.lajos@gmail.com
orcid.org/0009-0000-7501-9871

Lajos Halmi
PhD student
Ludovika University of Public Service
Doctoral School of Military Engineering
halmi.lajos@gmail.com
orcid.org/0009-0000-7501-9871

Mészáros Zoltán

Repülés és repülőeszközök az első magyar katonai szakfolyóiratban 1877 és 1907 között

Hogyan és mikor jelent meg a magyar katonai szaksajtóban a repülés? Milyen aviatikai találmányokról és feltalálókról olvashatott a magyar katona a 19. század végén és a 20. század elején? A tanulmány a repülésnek – és különösen katonai alkalmazásának – a nyomait vizsgálja az első folytatólagosan megjelenő magyar katonai szakfolyóiratban, a Ludovika Akadémia Közlönyében.

Kulcsszavak: Magyar Királyi Honvédség, Ludovika Akadémia, Ludovika Akadémia Közlönye, katonai tudományos folyóirat, repüléstörténet, léghajó, léggömb, repülőgép

1. A magyar repülőtitkárság kezdetei dióhéjban

A repülés katonai célú felhasználása a 19. század utolsó évtizedéig nem jelent meg az Osztrák–Magyar Monarchiában. A századfordulóra a közös hadsereg már rendelkezett léghajóosztagokkal és Bécsben kiképzett léghajóvezetőkkel, illetve az aviatikában jártas műszaki tisztekkel is. A repülőgépek viszont az egész kontinensen késve jelentek meg, s noha 1908 végén a Magyar Automobil Club elhatározta, hogy létrehoz egy légügyi bizottságot, ez végül nem valósult meg. Az új technológia az I. világháború elején is csak a léghajókhoz hasonlóan felderítőeszköz volt [1, p. 192], majd még a háborúban önálló fegyvernemmé vált, a repülőtitkárság azonban még váratott magára. A nyertes hatalmak 1921 nyaratól 16 hónapra teljes repülési tilalmat rendeltek el Magyarországon, a repülőgépeket pedig megsemmisítették. Ezért polgári keretek között, 1923-tól volt lehetőség elindítani a képzést, amely az 1922 óta működő Magyar Légiforgalmi Rt. pilótaiskolájában, Szombathelyen zajlott. Elméleti repülőtitkárság 1925-től volt, 1926-tól pedig azon tisztek számára, akik a Ludovika Akadémiát kiváló minősítéssel végezték el, gyakorlati kiképzést tettek lehetővé. 1927-től, a nagyhatalmak katonai ellenőrzésének végétől a Ludovika 4. évfolyamos hallgatói közül 20-an mehettek két éves kiképzésre Szombathelyre [2, pp. 17–18]. 1931-ig kellett várni arra, hogy – miután a Honvédelmi Minisztérium átszervezte a tisztképzést – a repülőtitkárság nagyobb teret kaphassanak. A minisztérium két tanulmányi főcsoportot hozott létre: a Ludovika Akadémián az I. főcsoport (gyalogos, lovassági és tüzér), a Hűvösvölgyben pedig a II. főcsoport (műszaki, híradó, repülő, folyamór) működött. 1939-ben végül a légierő önálló képzőhelyet kapott, amikor a tisztképzés három katonai főiskolára került: a magyar királyi honvéd Ludovika Akadémiára (gyalogos, lovasság, tüzérség), a magyar királyi Horthy Miklós Honvéd Repülő Akadémiára (légierő) és a magyar királyi Bolyai János Honvéd Műszaki Akadémiára (műszaki fegyvernemek és csendőrség) [3, pp. 244–248].

2. Tudományos folyóirat a tisztképzés szolgálatában

A *Ludovika Akadémia Közlönye* az első folytatólagosan megjelenő magyar nyelvű katonai szakfolyóirat. A lapot a magyar királyi Honvéd Ludovika Akadémia tanárai szerkesztették 1873 novembere és 1907 decembere között. A folyóirat küldetésnyilatkozata az *Ellenőr* című napilap 1873. december 27-i számában olvasható:

„Kitűztük a magasztos célt, mely a »Ludovica-Academia Közlönye« megindításakor szemünk előtt lebegett és a melynek lehető elérésére ernyedetlen kitartással törekszünk. Kijelelni s illetőleg közelebből meghatározni szándékunk még, úgy t. olvasóink mint t. munkatársaink bővebb tájékozása céljából amaz irodalmi tért, melynek művelésére a midőn legfőbb igyekezetünket fordítjuk, t. munkatársaink becses közreműködését is remélni bátorzkodunk.

Folyóiratunk tartalmának tárgyait az ímént kifejtett rendeltetéshez képest általában véve a következők képezendik:

Katonai tudományos kérdéseknek eredeti cikkekben való tanulmányozása és tárgyilagos megvitatása; általános hadtudományi és szak-nézetek, javaslatok értekező kifejtése; hadászati és hadtörténelmi tanulmányok, különös tekintettel egyrészt az újabbkori hadjáratokra másrészt honunk katonai történelmére; a harcászat, erődítészet, fegyvertan nevezetesebb mozzanatairól és vívmányairól írt és ez utóbbiaknak viszonyaink szerinti alkalmazását tárgyazó mint nemkülönben tereptani, országfelmérési és geodeticus értekezések; az egyes államok egymáshoz való viszonylatainak ismertetése, hadi földleírásai, hadászati, hadszervezeti és statisztikai tekintetben; a hadviselésre befolyással bíró, bármely szakban felmerülő vívmány, találmány értékének és mikénti legelőnyösebb felhasználhatóságának bíráló alá vétele; seregellátási és egészségügyi tanulmány-cikkek; közlekedési ügyek hadi szempontból bírálva; a távirat- és távjelzési szak hadi célokra való használatának fejlesztéséről írt ismertetések, nézetek és javaslatok; közlemények a nevezetesebb államok hadszervezetéről, haderőik fejlődésének folyton figyelemmel kísérése és viszonyított összehasonlítása.

Ezenkívül a Közlöny feladata lesz az idegen kitűnőbb katonai művek és cikkek kivonatos átnézeti ismertetése, és az érdekesség mérvéhez képest rövidebb külföldi hadirodalmi dolgozatoknak magyarra fordítása, továbbá magyar nyelven megjelenő katonai műveknek tájékoztató bíráló bemutatása.

A Közlöny kizárólag tudományi dolgozatoknak szánt szaklap lévén, politikai vagy személyes ügybeli kérdések megvitatása rendeltetésén kívül esik.” [4, p. 2]

A *Ludovika Akadémia Közlönye* jelentős hatással volt a magyar katonai műnyelv fejlődésére, a magyar hadtudományra, és mivel a szerkesztők több ezer idegen nyelvű szemlét, referátumot és könyvismertetést írtak a naprakészen számontartott külföldi szakirodalom alapján (rendszeresen 30-50 folyóiratról szemlézték, a szerkesztőség pedig maga is előfizetett lapokra: például 1887-ben a Monarchiából 4 magyar és 3 német nyelvű lapra, a Német Császárságból 4, Franciaországból 2, Svájcól 1 francia folyóiratra, valamint 1-1 olasz, brit és orosz periodikára, amelyek felhasználásával csak abban az évben 512 cikk született [5, p. 98]). 34 éven keresztül ez a folyóirat volt a honvédség általános és meghatározó forrása a hazai, de különösen a külföldi hadművészeti, hadelméleti, haditechnikai stb. állapotok és a fejlődés mindenkori irányai tekintetében. Különösen az előfizetői körhöz tartozó katonai szervezetek (Honvédelmi Minisztérium, Honvéd Főparancsnokság, kerületi parancsnokságok, gyalog- és lovasdandárok

parancsnokságai, m. k. csendőrpáncsnokságok, gyalogezredek, huszárezredek, továbbá a hadapródiskolák, központi lovasiskola, központi ruhatár, központi fegyvertár, honvéd lőszerbizottság stb.) magas száma és az egész Monarchia területén történő elhelyezkedése reprezentálja a széles körű és folyamatos ismertséget [6].

A *Közöny* 100–140 oldal terjedelmű, évi átlagosan tíz lapszám periodicitású folyóirat (általában a június–júliusi és az augusztus–szeptemberi számot összevonták), amelynek tartalmát a teljes megjelenési ciklus alatt növekvő mértékben, 22–74%-ban külföldi szakirodalmi referátumok és könyvszemlék adták. Nagyrészt ennek köszönhetően a korra jellemző újdonságok és azok katonai alkalmazhatósága gyakori téma (például az első francia elektromos hajtású tengeralattjáró, amelyet 1888-ban építettek és 1890-ben két cikkben is előfordul, vagy az 1884-ben kifejlesztett Maxim-géppuska, amely 1885 februárjában jelenik meg a *Közöny*-ben), így nem meglepő, hogy a repülés is visszatérő téma volt a lap hasábjain.

Az összes megjelent lapszám 22%-ában (366-ból 81-ben) fordul elő repüléssel kapcsolatos tartalom, mindösszesen 110 cikkben.¹ Ebből 74 szemle, 13 tanulmány, 11 kisebb közlemény, 8 könyvismertetés, 4 pedig a Katonai újdonságok rovatban jelent meg. Az első megjelenés az 1877. évi 3. szám, a téma leggyakoribb előfordulása pedig a 15. évfolyam, azaz 1888: ebben az évben 10 alkalommal találkozhatunk repüléssel kapcsolatos tartalommal a folyóiratban. Az első években (1877–1881) csak szórványosan jelennek meg aviatikai tartalmú írások, jelenlétük 1887-től folyamatos (az 1899-es és az 1904-es esztendőket leszámítva). Az 1887–1894 közötti időszakban jelenik meg a teljes tartalom 51%-a, ami évente átlagosan 7 cikket jelent.

A 110 cikk technikailag három csoportra bontható: a 13 tanulmányra, a 8 könyvismertetésre és a fennmaradó tartalomra, amelyek gyakorlatilag referáló cikkek.

A tanulmányokat 11 szerző írta, ők a következők: Czékus Zoltán² (*A léghajó harctéri alkalmazása*, LAK 1906/4, 397–413), De Sgardelli Caesar³ (*A léghajózás fejlődése az utolsó években*, LAK 1907/5, 781–794), Dondon Olivér⁴ (*Adatok a kormányozható léghajó kérdésének megítélésére*, LAK 1906/2, 170–187), Geöcze István⁵ (ford., *A léghajók hadi alkalmazása*, LAK 1892/3, 272–295), Kemény Ferenc⁶ (*Jelentés a párizsi kiállítás katonai osztályáról 2.*, LAK 1890/1, 36–50), Mikoss Aladár⁷ (*A léghajó a várban*, LAK 1901/7–8, 611–620; *A katonai léghajózás*, LAK 1903/2, 222–234), Müller Hugó⁸ (*A léghajózás a hadviselés szolgálatában*, LAK 1887/3, 178–188;

¹ Ezek évenkénti és lapszámok szerinti eloszlásáról lásd az 1. táblázatot.

² Czékus Zoltán, vitéz (Miskolc, 1881–?). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata ezredes. A Ludovika Akadémián a hadtörténelem, hadászati szolgálat tanára, gyalogkülönítmény parancsnoka, közigazgatási főnök. Lásd [7, p. 694] [8, 782939].

³ Sgardelli Caesar, de (Sgardelli Cézár Ágost) (Budapest, 1884. június 28. – Tiszabó, 1953. január 30.). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata alezredes. Katonai szakíró [8, 732742] [9].

⁴ Dondon Olivér (Tasnád, 1859. november 6. – Kolozsvár, 1909. december 7.). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata ezredes. A Ludovika Akadémián a német nyelv és német katonai iránylytan, valamint a szolgálati szabályzat tanára, évfolyamparancsnok. Lásd [7, p. 965] [8, 884601] [10, pp. 633–634].

⁵ Geöcze István, szendrői (Bacska, 1836. július 25. – Fenyőkosztolány, 1902. március 7.). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata százados. A Ludovika Akadémián a hadseregvezetés és a gyakorlati szabályzat tanára. Lásd [7, p. 966] [8, 719208] [9] [10, pp. 641–642].

⁶ Kemény (Kohn) Ferenc (Nagybecskerek, 1860. július 17. – Budapest, 1944. november 21.). Pedagógus, sportvezető, tanügyi szakíró, a Nemzetközi Olimpiai Bizottság alapító tagja, a Magyar Olimpiai Bizottság alapító titkára, tartalékos huszár főhadnagyként szolgálaton kívüli viszonyban. Lásd [8, 664361] [9] [10, pp. 657–658] [11, pp. 9–15].

⁷ Mikoss Aladár (Szekszárd, 1874. március 23. – ?). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb ismert rendfokozata százados [8, 895923].

⁸ Müller Hugó, mühlwerthi (Grafendorf, 1846. január 28. – ?). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata alezredes. A Ludovika Akadémián a természettan, vegytan, technológia, fegyvertan, utásztan tanára, fegyvertiszt, a fegyvermintaterem gondozója. Lásd [7, p. 974] [8, 727249] [9] [10, pp. 671–672].

A természettudományok legújabb haladása a háború szolgálatában, LAK 1896/2, 59–72), Nagel Arnold⁹ (A léghajózás és a háború, LAK 1885/2, 81–111), Nónay Dezső¹⁰ (Az orosz katonai léghajózás szervezete és a léghajós osztályok működése hadgyakorlatok alatt, LAK 1893/1, 65–75), Pervulescő Sándor¹¹ (A léghajózás és hadi célokra felhasználása, LAK 1894/6–7, 659–683) és Straub Sándor¹² (A léghajó a hadászat szolgálatában, LAK 1881/7, 523–529).

1. táblázat

A Ludovika Akadémia Közlönyének megjelent lapszámai. A sárga színű cellák azokat a lapszámokat jelzik, ahol repüléssel kapcsolatos cikk jelent meg – ha egy számban több ilyen cikk is található, a számuk zárójelben olvasható. A jobb szélső oszlopban az év szerinti összesítés látható [a szerző]

Évf.	Év	A Ludovika Akadémia Közlönye lapszámai												Évi összes		
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
1.	1873													1.	2.	
1.	1874	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.			
2.	1875	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
3.	1876	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
4.	1877	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.		1	
5.	1878	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.		1	
6.	1879	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.		1	
7.	1880	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.		2	
8.	1881	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.		1	
9.	1882	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
10.	1883	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
11.	1884	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.			
12.	1885	1.	2. (2)	3.	4.	5.	6.	7.	8–9.	10.	11.	12.			3	
13.	1886	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8–9.	10.	11.	12. (2)			2	
14.	1887	1.	2.	3. (3)	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11. (2)	12.			6	
15.	1888	1.	2.	3. (3)	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11. (3)	12.			10	
16.	1889	1.	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11.	12.			5	
17.	1890	1.	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10. (2)	11. (2)	12.			8	
18.	1891	1.	2. (2)	3.	4.	5.	6–7. (2)		8–9.	10.	11.	12.			8	
19.	1892	1. (2)	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10. (2)	11.	12.			7	
20.	1893	1. (3)	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11.	12.			6	
21.	1894	1. (2)	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11. (2)	12.			6	
22.	1895	1.	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11.	12.			2	
23.	1896	1.	2. (2)	3.	4. (2)	5.	6–7.		8–9.	10.	11.	12.			6	
24.	1897	1.	2.	3.	4.	5.	6–7. (2)		8–9.	10.	11.	12.			3	
25.	1898	1.	2.	3.	4. (2)	5.	6–7.		8–9.	10.	11. (2)	12.			6	
26.	1899	1.	2.	3.	4.	5.	6–7.		8–9.	10.	11.	12.				

⁹ Nagel Arnold (Kis-Hradiska, 1834. március 31. – ?). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata alezredes. Lásd [8, 727401] [9] [10, p. 672].

¹⁰ Nónay Dezső (Felsővisó, 1857. június 29. – Esztergom, 1939. szeptember 20.). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata vezérőrnagy. A Ludovika Akadémián a gyakorlati szabályzat tanára, harcászati kiképzésvezető, századparancsnok. Lásd [7, p. 975] [8, 728088] [9] [10, pp. 674–675].

¹¹ Pervulescő Sándor (Mehádia, 1837. május 24. – ?). Tényleges állományú katonatiszt, legmagasabb rendfokozata ezredes. A Ludovika Akadémián a tereptan és terepraiz tanára, századparancsnok. Lásd [7, p. 976] [8, 729308] [9] [10, p. 683].

¹² Straub Sándor (Szolnok, 1857. január 13. – Nádudvar, 1923. február 12.). Gépészmérnök, elektrotechnikus, tanár. Lásd [8, 659964] [9] [10, p. 692].

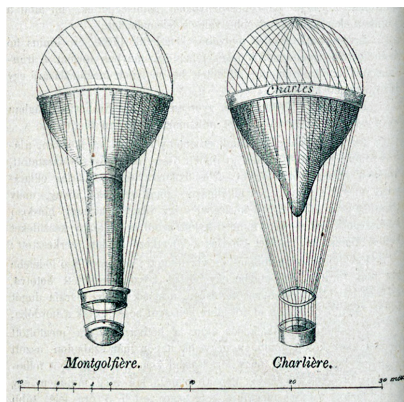
Évf.	Év	A Ludovika Akadémia Közlönye lapszámjai										Évi összes
27.	1900	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9. (2)	10.	11.	12.	6
28.	1901	1.	2.	3.	4.	5-6.	7-8. (2)	9.	10.	11.	12.	6
29.	1902	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12. (2)	4
30.	1903	1.	2. (2)	3. (2)	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12.	4
31.	1904	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12.	
32.	1905	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12.	1
33.	1906	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12.	3
34.	1907	1.	2.	3.	4.	5.	6-7.	8-9.	10.	11.	12.	2

A szerzők közül többen mérnöki vagy természettudományos végzettséggel rendelkeztek (például Nónay Dezső, Müller Hugó, Straub Dezső), ezért foglalkoztathatta őket a technológia, mások pedig nyelvismeretüket felhasználva fordítottak többek között ilyen anyagokat is (például Geöcze István, Dondon Olivér). A nagyobb lélegzetvételű dolgozatok (6–30 oldal közötti, jellemzően 10 oldalt meghaladó terjedelmű) közül kettő témája nem kizárólag a repülés (Müller Hugó: *A természettudományok legújabb haladása a háború szolgálatában* és Kemény Ferenc: *Jelentés a párizsi kiállítás katonai osztályáról 2.*), azonban ezekben a cikkekben is jelentős fejezetet szántak az aviatikának.

3. Nagyobb lélegzetvételű tanulmányok

„A történelem arról tanúskodik, hogy az ember épp oly régóta fáradozik azon, hogy a világűrben [ebben a kontextusban a világűr a levegő – a szerző megjegyzése] is mozoghasson, mint a mily régi keletű az óceánon való áthajózásra törekvő igyekezete.” [12, p. 659]

Amikor 1877-ben, a *Ludovika Akadémia Közlönyében* az első repüléssel kapcsolatos cikk megszületik, a légi járművel történő repülés már közel 100 éves múltra tekint vissza, hiszen Joseph és Étienne Montgolfier, majd később Jacques Alexandre César Charles 1783-ban hajtotta végre első útját hőlégballonnal (1. ábra), amellyel mintegy 2000 m-es magasságba emelkedtek [13, pp. 13–16].



1. ábra

A Montgolfier- és a Charles-féle hőlégballon [18, p. 88]

Az 1870-es és 1880-as években a *Közlöny* szerzői – ahogyan a közös hadsereg és a honvédség vezetői is – mérsékelt érdeklődést mutattak a repülés és különösen annak katonai vonatkozása iránt. Ennek oka az lehetett, hogy jelentős – működőképés – műszaki újítás évtizedek óta nem történt a területen, így ekkor a légi jármű tulajdonképpen csak hidrogénnel töltött léggömböt jelentett, amelynek alkalmazás szempontjából két típusa létezett: a kikötött és a szabadon repülő ballon. Előbbi megfigyelési célokat szolgált, utóbbi elméletileg lehetőséget biztosított volna postai és futárszolgálatra, azonban még évtizedekig nem sikerült érdemben megoldani a legnagyobb kihívást, a kormányozhatóságot. Azokban az országokban, ahol léghajós osztagok működtek ekkor, általában telepített és tábori, azaz hordozható rendszerek léteztek, utóbbiakat hadiállapot esetén alkalmazták.

Az 1881-ben megjelent első hosszabb tanulmány [14, pp. 523–529] szakirodalmi hivatkozásokkal – többek között a szerző, Straub Sándor egy 1879-es cikkére utalva [15, pp. 289–303] – részletesen mutatja be a léghajózás korai történetét, egyúttal kitérve arra, hogy Napóleon alatt és után miért nem terjedt el jobban ez az eszköz.¹³

Straub megemlíti a történelem első légitámadását is, amely az osztrákok 1849. évi velencei ostromához köthető, amikor a haditengerészet Volcano gőzhajójáról körte formájú, 90 m³ beltartalmú papír gázzömböket indítottak, amelyek 20,6 kg-os bombákat hordoztak. Mivel a légáramlás kiszámíthatatlan és változó volt, a töltetek jelentős része a tengerben landolt vagy rossz magasságban működött el, így különösebb kárt nem okozott [16, pp. 1–16].

A cikk fontos mérőföldkőként említi az amerikai polgárháborút, ahol a ballonokat megfigyelésre használták, viszont a korábban ilyen körülmények között alkalmazott távközlési technológiát (azaz kövekre kötött, papírra írt üzenetek ledobása vagy postagalambokkal történő kommunikálás) fejlesztették tovább az „elektronikus sürgöny”, azaz táviró fedélzetre történő telepítésével. A megfigyelések során fényképezték is az ellenséges állásokat – ilyen légifotókat először 1859-ben, a solferinói ütközet során készítettek kikötött ballonról.

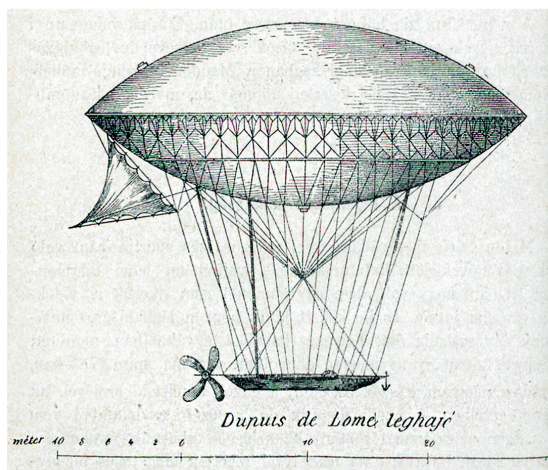
Európai vonatkozásban a porosz–francia háború volt ebben az időszakban meghatározó a léghajózás történetében, ugyanis Párizs 1870. évi ostromakor – amelynek során a németek még a Szajna medrét is hálókkaal biztosították azért, hogy ne juthasson ki senki a városból – a posta igazgatója és néhány elszánt léggömbkészítő, fényképész és kalandor arra vállalkozott, hogy ballonokkal juttatnak ki üzeneteket és embereket, megteremtve ezzel a légipostát és a légi hidat is. Az ostrom négy hónapja alatt összesen 65 ballon hagyta el Párizst, rajtuk 155 személy utazott. A hatékonyság fokozása érdekében a postát mikrofényképezési technológiával kicsinyítették, így a léggömbökön szállított postagalambok lábára jelentős mennyiségű magán- és hivatalos üzenetet lehetett felhelyezni. Az itt tapasztalt sikerek vezettek ahhoz, hogy Franciaországban ismét hivatalosan is folytatni lehessen a katonai léghajókkal kapcsolatos kísérleteket.

A cikk végül röviden beszámol arról, hogy Woolwichban, illetve az oroszoknál is élénken foglalkoznak a katonai léghajózással, sőt Bécs figyelmét sem kerüli el ez a technológia.

¹³ Napóleon ugyan érdekelték a technikai újítások, de a bonyolult kiképzés, a nehéz szállíthatóság – számos fogatra volt szükség a palackozott hidrogén, a kötélzet, a kosár és az összehajtott ballon mozgatásához, utóbbi ráadásul könnyen sérülhetett – és a lassú bevethetőség nem volt összeegyeztethető a gyorsaságon és meglepetésen alapuló taktikájával, ezért 1799-ben feloszlatta a meudoni léghajós kiképzőiskolát (erről lásd: [17, p. 21]). Az egyiptomi hadjáratban (1798–1801) azonban Napóleon még használta a ballonokat, ám már nem megfigyelésre, hanem – Straub szerint – ugyanúgy az ellenség moráljának megtörésére, mint a fleurusi csatában 1794-ben. (Vö. [14, pp. 523–529]).

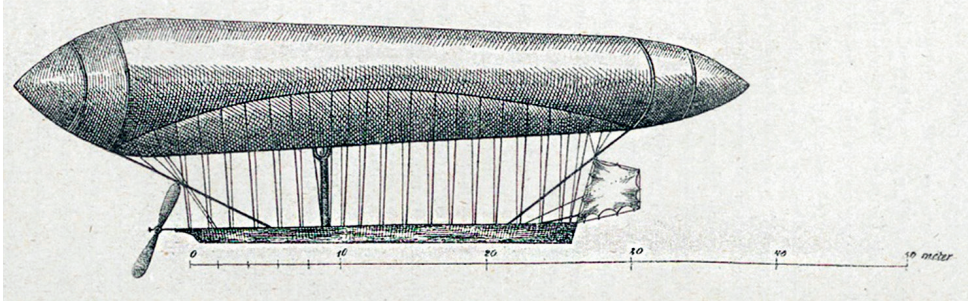
1885-ben Nagel alezredes szerint a léggömb főként katonai alkalmazásra való – leszámítva a meteorológiai megfigyeléseket –, hiszen táviró segítségével gyorsabban lehet kommunikálni, gőzzel nagyobb mennyiségű szállítmányt lehet továbbítani, azonban a harctéri megfigyelés területén nincs jobb eszköz. Az aktuális fejlettségi szinten 400 m-es magasságból a léggömbök részletes áttekintést nyújtanak 2 mérföld (megközelítőleg 3,2 km) átmérőjű, általános áttekintést 4 mérföld (6,4 km) átmérőjű területről, és általános kilátást biztosítanak mintegy 15 mérföldes (24,1 km) sugarú körben, ezzel szemben egy négy századból álló lovasezred felderítőképessége 2 mérföld (3,2 km), hat századdal pedig 3 mérföld (4,8 km).

A légi járművek legfőbb problémája továbbra is a kormányozhatóság, amivel kapcsolatban sikeres kísérleteket ismertet részletesen, így Charles Renard és Arthur Constantin Krebs (3. ábra), valamint Henri Dupuy de Lôme (2. ábra) léghajóit, amelyek egyaránt hosszúka alakúak, továbbá elektromotor és légcsavar biztosítja a haladásukat. Habár ezek az 1870-es és 1880-as években tett kísérletek sikeresek voltak, a rendelkezésre álló motorok és akkumulátorok teljesítménye elmaradt a szükségéstől, így a kormányzás csak ideális körülmények között és rövid ideig valósult meg.



2. ábra
Henri Dupuy de Lôme léghajója [18, p. 92]

A szerző katonai szempontból két területet vizsgál. Mint megfigyelőeszköz továbbra is komoly lehetőségként számol a repüléssel, habár a kormányzás, a stabilitás és a kommunikáció vonatkozásában a jelenlegi technológia fejlesztésre szorul. A léghajók harcértékét nem látja jelentősnek: egyrészt a nemzetközi egyezmények egyébként is tiltanak bizonyos gyújtó- és robbanóeszközöket, másrészt mivel a jelenlegi léghajók nem kormányozhatók (esetleg csak ideális időjárási körülmények esetén), nem tudnak a kijelölt zóna fölött megállni, így pusztítani képesek lennének, de nem célzottan. A harctéren való alkalmazás ellen szól az is, hogy természetüknél fogva nem lehet az eszközöket elrejtetni, mozgásuk lassú, 80 m-es emelkedésig akár egy nyíllal is kárt lehet bennük okozni, belövés esetén felrobbanhatnak, és csak szélmentes, tiszta látási körülmények között hatékonyak. A léghajók harci alkalmazására egyedül a várharcot (ostrom) tartja relevánsnak [18, pp. 81–111].



3. ábra

Charles Renard és Arthur Constantin Krebs elektromos meghajtású léghajója [18, p. 99]

Két évvel később, 1887-ben a hadmérnök Müller százados továbbfűzi a kormányozható léghajóval kapcsolatos gondolatot. Dondon Olivér szerint „Kormányozható légjáromű alatt oly szerkezetet érthetünk, mellyel a levegőben, bármely irányban, több órán át, a szélről függetlenül, az évnél legalább $\frac{3}{4}$ részében biztosan mozoghatunk.” [19, p. 170]. Müller százados két iskolát azonosít: az egyik szerint a létező léghajókat kell alapul venni, és a motorok teljesítményét kell növelni (itt megemlíti a légszavar elhelyezésének problémáját is, mert meglátása szerint a ballon és a gondola nem tud azonos horizontális sebességgel mozogni), a másik viszont teljesen mellőzné az emelő léggömböt, így „valóságos repülő szerkezetet óhajtanak, mely saját magának, valamint a szállítandó tehernek súlyát tetszés szerinti (függélyes, ferde, vízszintes) irányban mozgatja” [20, p. 180].

Elméleti síkon a problémát a két eltérő – vízszintes és függőleges – mozgásforma egyidejű alkalmazásának kivitelezésében látja. A megvalósítással kapcsolatban vázol saját elképzelést egy bonyolult eszközről, ami csak ferde emelkedésre és süllyedésre képes, ugyanakkor tud függeszkedni, és amellyel kapcsolatban úgy látszik, a szerző a levegőt szinte teljesen a vízhez hasonló közegként képzei el:

„A motor, valamint a szállítandó teher (légiutasokat, küldeményeket) befogadó kosár, két, egymás fölött 2-3 m-nyi távolságra levő, hosszúkas hajófedélzetalakú erős keret közepén állnak; mindkét oldalon a madár- vagy halszárnyak mozognak, melyek előre- és hátrafelé löknek. A madárszárnyhoz hasonló berendezésük lévén, az előremozgás alatt semmi légellenállást nem szenvednek, míg a hátramoszgas alatt madártollalakú lemezei egymáshoz záródnak és a levegőre nyomást gyakorolnak. A két vízszintes kereten harántosan álló, redőnyalakú vékony lemezek (vitorlák) vannak: ha ezek le vannak fektetve, akkor összefüggő, a keret által határolt sík lapot képeznek. Vízszintes mozgásnál vagy lebegésnél a mindkét keretbeli lemezek lefektetődnek, mi által a készülék szálló ernyő módjára csekély erővel a levegőben tartható. Ferde irányban felfelé való röplésnél a felső keretnek lemezei előrészükkel kisebb-nagyobb szög alatt felállítatnak; az alsó keretnek lemezei erős ellen-légáramlás esetén lefektetve maradnak, csendes levegőben pedig szintén felállítatnak. A gép előre felé dolgozik. A leírt berendezés mellett függélyes irányú fel- vagy lefelé való mozgás nem lehetséges ugyan, de ezt teljesen pótolja a tetszés szerinti szög alatt eszközölhető ferde mozgás. Egyúttal azon előny éreik el, hogy a röplőgépnél szerkezete egyszerűbb és könnyebb lehet. A röplőgép végül egy kormányozható szárnyal (farkkal) is bír,

melynek hossz tengelye forgatható úgy, hogy ezen egyetlen kormányozható szárny, akár melyik irányba való mozgásváltoztatást tesz lehetővé. Az általam jelzett röplőgép még a mostani, hiányos motorokkal is megérdemelné a kísérletet." [20, pp. 181–182].

Müller Hugó szerint az ideális repülőgéphez szükséges egy tehermentesítő eszköz (gázzal töltött ballon), ami a gép fajsúlyát szabályozza, egy erős motor (fejlesztett elektromotor vagy sűrített gázüzemű, előbbi esetén erős és könnyű áramforrás is), és mivel ismeri a légellenállás jelenségét, fontos a gép alakjának helyes megválasztása.¹⁴

Ilyen repülőgépek alkalmazhatók lennének terep- és kémszemlék, valamint előőrsi feladatok megvalósítására (éjjeli bevetéseknél reflektorokkal), légi harcra („ellenséges léghajóknak léggömbágyúval való lödözése" [20, p. 186]), bombázásra (ejtőbombákkal ellenséges területek és eszközök, valamint a hátszágai infrastruktúra rombolása) és ellenséges csapatok zavarására és támadására is – amivel gyakorlatilag le is írta a légierő alkalmazásának területeit a rádiózavarást leszámítva a II. világháború végéig.

A cikk végén ismerteti a katonai léghajózás aktuális állapotát a francia, az orosz, az olasz, a német, az angol, az amerikai és az osztrák–magyar haderőben. Utóbbiról az derül ki, hogy pár kísérleten nem jutottak még túl, noha Müller szerint sürgősen változtatni kellene ezen. Javaslat alapján Komárom központi állomás mellett Bécs, Theresienstadt, Krakó, Przemysl, Brassó, Pétervárad, Szarajevó, Kotor, Póla, Trentó és Kufstein településeken lenne szükséges telepíteni egy-egy léghajós osztagot (egy osztag: 4 tiszt és 20 fős legénység) 1-1 kormányozható léghajóval és 2-2 ballon *captif* (rögzített léggömb) alkalmazásával. Ezeket az osztagokat pedig idővel minden hadtestre fel kell fejleszteni, ahol a bevetésükről az adott hadtestparancsnok dönthet, a technikai kérdésekben pedig műszaki bizottság lenne felelős [20, pp. 178–188].

Geőcze István olasz forrása szerint a hamarosan megvalósuló kormányozhatóság mellett a léghajókat továbbra is főként megfigyelésre fogják használni, emellett szállító és jelző szerepkörben is feltűnnek majd. Bemutatja az eddigi expedíciós eredményeket (Egyiptom, Abesszínia, Tonkin), s azt gondolja, a gyarmatosításban főként arra fogják használni a léghajót, hogy a civilizációtól távol élő népcsoportokra pszichés nyomást gyakoroljanak. A történeti áttekintés és a technológiák (távközlés, fényképezés) bemutatása után kitér arra, hogy a Monarchiában továbbra sincsenek léghajós alakulatok, de pár tiszt – köztük hadmérnökök – feladata közé tartozik a nemzetközi fejlemények nyomán követése [22, pp. 272–295].

Nónay százados cikkében kifejezetten az 1892. évi orosz viszonyok bemutatására vállalkozik, amelyből megtudhatjuk, hogy 1890 óta, amikor megjelent az orosz katonai léghajózási szabályzat, két hadgyakorlat is lezajlott már. 1889-től létezik Szentpéterváron katonai léghajós tanfolyam, az itteni telepen kívül pedig várléghajós és tábori léghajós osztályokat állítottak fel. A katonai léghajózás a műszaki vezérigazgatóság alá tartozik, és közvetlenül az elektrotechnikai osztály vezetőjének rendelték alá, aki a léghajós szervezet parancsnoka. A szentpétervári telep évi költsége átszámolva mintegy 30 000 Ft, anyagfenntartása pedig 18 000 Ft [23, pp. 65–75].

A Geőcze százados cikkében említett távjelző szerepkör mint önálló csoport jelenik meg Pervulescő nyugalmazott ezredes munkájában, a szabad és „fékezett vagyis fogva tartott" léggömb mellett. Müller Hugó 1887-es cikkében mutatja be a Chathamben állomásozó Royal

¹⁴ Arra, hogy Müller Hugót élénken foglalkoztatta a repülés technikai megvalósítása, bizonyíték 1896-ban megjelent természettudományi dolgozata is, ahol újabb példákon keresztül mutatja be a legújabb eredményeket (például Andrée léghajója és Maxim repülőgépe). Lásd [21, pp. 67–72].

Engineers kísérleteit, amelyek során léggömbökbe izzólámpákat telepítettek, ezek jelzései (300–400 m-re felbocsátva a gömböket) mintegy 24 km-ről láthatók [20, p. 186].

Az alakulatok országonkénti felsorolásában az Osztrák–Magyar Monarchia kapcsán kiderül, hogy 1890-ben és 1891-ben Bécsben Victor Silberer léghajós tanfolyamán több, főként műszaki tiszt is részt vett, majd a birodalmi hadügyminisztérium felállította a Katonai Aeronautikai Intézetet (k. u. k. Militäraeronautischen Anstalt), ennek első parancsnokává Josef Trieb utász főhadnagyot nevezték ki. Az intézet a parancsnok mellett egy főhadnagyból (a vasúti ezredből), egy tűzmesterből, négy altisztből és huszonhat közkatonából állt. A szükséges infrastruktúra 1893 nyarára elkészült, az egység – tulajdonképpen század – pedig az 1. vartüzérezred 1. ütegének alárendelt egység állományába került [24, pp. 13–15].¹⁵

A katonai léghajózás korábban ismertetett területei – felderítés, fényképezés, légi híd – mellett Pervulescő megemlíti még a tűzvezetést is [12, pp. 659–683].

1901-ben a vartüzérségeknél alkalmazott légi járművek tekintetében Mikoss főhadnagy megjegyzi, hogy a sárkányléghajók ugyan 400 m magassáig bármilyen időjárási körülmény között felengedhetők, „igen jó szemre és másodszor igen jó gyomorra van szüksége a léghajósnak, nem is említve a szédüléstől való mentséget” [26, p. 615]. A léghajók erődben történő felhasználásának két területe van: részben taktikai megfigyelés, részben pedig az ellenséges tüzérség tevékenységének monitorozása, amelynek során 700–5000 m közötti távolságról érkező tüzérségi tűz forrása biztosan azonosítható. Mikoss szerint nyilvánvaló probléma, hogy ostrom alkalmával az ellenség azonnal tűz alá próbálja venni a léghajót, azonban ez egyrészt nehéz (csak olyan srappal lehetséges, amely közvetlenül a ballon közelében robban), másrészt pedig a találatot kapott léggömb nem zuhan le, hanem fokozatosan veszít a repülési magasságából. Az ellenséges tűz kivédésére a rögzített ballon folyamatos áthelyezését javasolja [26, pp. 611–620].

1906-ban, azaz 9 évvel Schwarz Dávid kormányozható léghajójának bemutatása,¹⁶ hat évvel az első Zeppelin felszállása és három évvel a Wright fivérek sikeres repülése¹⁷ után

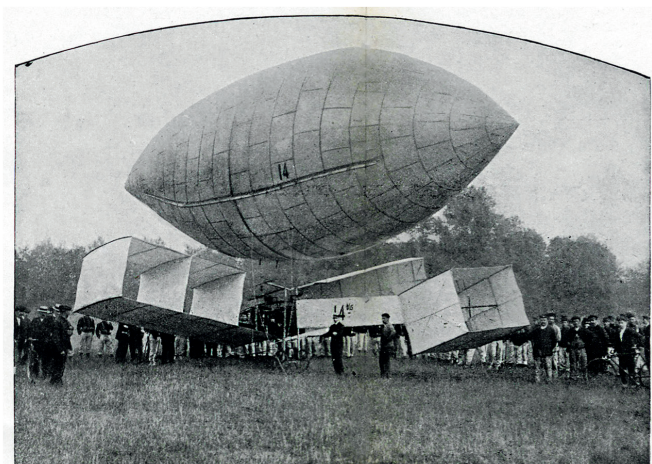
¹⁵ A Monarchia Pólában állomásozó tengerészeti osztagáról, amely képes hajóra is rögzíteni megfigyelőballont és ezzel akár tenger alatti eszközöket is felderíteni, lásd [25, pp. 222–234].

¹⁶ A keszthelyi születésű Schwarz Dávid merev szerkezetű, alumínium borítású, fektetett hasáb alakú kormányozható léghajót tervezett. A léghajót egy Daimler-féle négyhengeres, vízhűtéses soros benzinmotor hajtotta, amelynek teljesítménye 12 LE volt. A léghajó 38,32 m hosszú volt, vízszintes átmérője 12 m, függőleges átmérője 11 m, űrtartalma 3250 m³. Az első kísérleti felszállása 1896. október 9-én volt Berlinben a Királyi Katonai Léghajózási Osztály Tempelhofban található telephelyén, a gáz szennyezettsége miatt azonban nem tudták eléggé felemelni a léghajót. A második, ezúttal sikeres próbálkozásra tíz hónappal a feltaláló halála után, 1897. november 3-án került sor, amikor a léghajó felemelkedett, 15 percig repült, majd 460 m magasságban az egyik légcsvart leállt a hajtósíj leválása miatt, így a léghajó lezuhant és súlyosan megsérült. Schwarzot az özvegye képviselte, aki azzal a Carl Berg gyárossal kötött megállapodást, akitől korábban a léghajóhoz szükséges fémet vásárolták. Schwarz éveken keresztül dolgozott találmányán, amelyet először a Monarchiának ajánlott fel, azonban Edmund von Krieghammer bárót, a közös hadsereg hadügyminiszterét nem érdekelte az újítás, így végül elfogadta Dimitrij Zujev vezérkari ezredes, Oroszország bécsi katonai attaséjának ajánlatát, majd két évig Szentpéterváron kísérletezett. Mivel az oroszok nem voltak elégedettek az eredménnyel, Schwarz Berlinben folytatta a tesztek, amelyek végül sikerre vezettek. Az első repülésnél jelen volt von Zeppelin gróf is, aki végül megvásárolta a terveket, és ezt követően kezdte el építeni saját, LZ 1 jelű léghajóját, amely közel három évvel később, 1900. július 2-án szállt fel. Lásd [27].

¹⁷ Az Orville és Wilbur Wright által konstruált repülőgép, a Wright Flyer 1903. december 17-én, csütörtökön, 10:35-kor emelkedett a levegőbe. Noha a repülés csak 12 másodpercig tartott, ami alatt 36,58 m-t tett meg Orville Wright az észak-karolinai Kitty Hawkban, a saját építésű motorjával meghajtott jármű az első működőképes, ember szállítására alkalmas repülőgép volt. Az esemény híre sajtón keresztül eljutott Európába is, de 1906-ig kellett várni ahhoz, hogy a kontinensen is személyesen láthassanak az európaiak repülőgépet: ekkor tett meg egy 60 m-es utat a francia–brazil pilóta, Alberto Santos-Dumont Párizsban. Lásd [28, pp. 34–38].

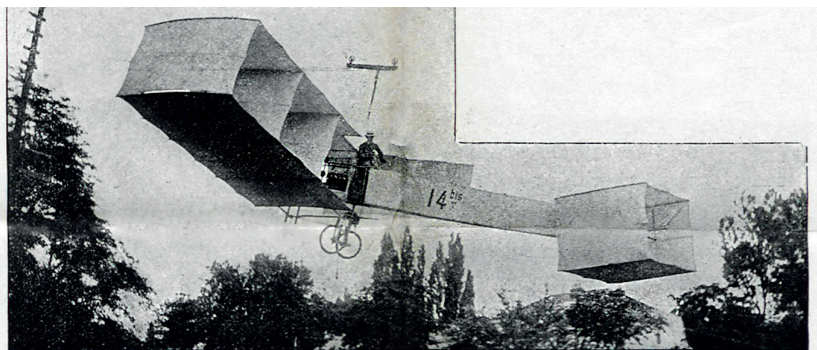
Dondon Olivér alezredes ugyancsak szkeptikus a repülés jövőjét illetően a *Közlöny* hasábjain: „A jelenlegi technikai segélyforrások mellett gondolni sem lehet használható légjáróművek előállítására és utóvégre is csak oly kormányozható léghajónk lesz, mely akkép fog viszonylani az ideális járóműhöz, mint a gőzcsonak a gőzhajóhoz.” [19, p. 187].

Czékus Zoltán hadnagy német nyelvű szakirodalmi forrásokból építkező 1906-os léghajós összefoglalóját [29, pp. 397–413] követően De Sgardelli Caesar hadnagy 1907-ben megjelent, fényképekkel illusztrált cikke az utolsó nagyobb, repüléssel kapcsolatos tanulmány a *Közlöny*-ben. Sgardelli hadnagy számos adatot közöl és kísérletről számol be, a repülés vonatkozásában pedig két irányzatot nevez meg: a kormányozható léghajók és a repülőgépek csoportját. Utóbbiaknál azonban megelégszik a Wright testvérek és Santos-Dumont (4. és 5. ábra) nevének említésével megbízható források hiányában, hiszen: „Sok mende-monda tárgya az amerikai Wright testvérek motoros repülőgépe, amelyet azonban eddig még komoly léghajós nem látott. Így nem áll módomban leírni.” [30, pp. 793–794].



4. ábra

Santos-Dumont repülőgépe léggömb segítségével emelkedik fel [30]



5. ábra

Santos-Dumont 14. számú repülőgépe [30]

4. Szemlék, hírek, referáló cikkek

A repüléssel, repülőeszközökkel kapcsolatos 89 szemle, hír, referátum eltérő terjedelmű (egy mondattól akár több oldalig terjedő) és minőségű, továbbá gyakran magukon viseli szerzőjük személyes véleményét, esetenként a hazai állapotokkal való összehasonlítást is. 59 esetben sikerült azonosítani a forrást, amelyek a következők (zárójelben a kiadó ország kódja, a nyelv és a hivatkozó cikkek száma): *Mitteilungen über Gegenstände des Artillerie- und Geniewesens* (OMM, német, 9); *Neue militärische Blätter* (DE, német, 6); *Vasúti és Közlekedési Közlöny* (OMM, magyar, 6); *Internationale Revue über die gesammten Armeen und Flotten* (DE, német, 5); *Organ der Militär-wissenschaftlichen Vereine* (OMM, német, 5); *Österreichische Militärische Zeitschrift* (OMM, német, 4); *Deutsche Heeres-Zeitung und Militär-Literatur-Blatt. Organ für Offiziere aller Waffen des Deutschen Heeres und der Marine* (DE, német, 3); *Militär-Wochenblatt* (DE, német, 3); *Journal des sciences militaires* (FR, francia, 2); *Katonai Lapok* (OMM, magyar, 2); *Revue du Cercle militaire. Bulletin des réunions d'officiers des armées de terre et de mer* (FR, francia, 2); *Die Vedette. Militär-Zeitschrift* (OMM, német, 2); *Wajennij Zbornik* (RUS, orosz, 2); *Armeeblatt* (OMM, német, 1); *Army and Navy Journal* (US, angol, 1); *L'Italia militare* (IT, olasz, 1); *Revue militaire de l'étranger* (FR, francia, 1); *Revue Militaire Suisse* (CH, francia, 1); *Rivista Militare* (IT, olasz, 1); *The Naval & Military Gazette and Weekly Chronicle of the United Service* (GB, angol, 1); *United Service Gazette* (GB, angol, 1). Mindösszesen tehát 38 német, 8 magyar, 6 francia, 3 angol és 2-2 olasz és orosz nyelvű beazonosított forrást használtak, amelyek a kiadás helye szerint a következők: 29 az Osztrák–Magyar Monarchiában, 17 a Német Birodalomban, 5 Franciaországban, 2-2 Nagy-Britanniában, Olaszországban és Oroszországban, 1-1 pedig az Egyesült Államokban és Svájcban jelent meg.

Tematikus bontásban a legnépszerűbb terület a különböző kísérletek (általános, repülés, kommunikáció, fényképezés, lövetés – ezekről összesen 41 cikk szól), a különböző léghajós alakulatok (20 cikk), a kormányozható léghajó kérdése (9 cikk) és a léghajózás aktuális helyzete (8 cikk). Részletesebben: általános kísérletek (13); kormányozható léghajó (9); a léghajózás aktuális helyzete (8); orosz alakulatok (7); német katonai kísérletek (6); orosz katonai kísérletek (6); léghajózás és a Monarchia (5); brit katonai kísérletek (5); francia katonai kísérletek (5); német alakulatok (4); repülőgép-kísérletek (3); léghajózás Párizs 1870-es ostroma alatt (3); léghajóval az Északi-sarkra (2); amerikai katonai kísérletek (2); brit, olasz, svájci és japán alakulatok (2-2); jog (1); olasz katonai kísérletek (1); francia alakulatok (1).

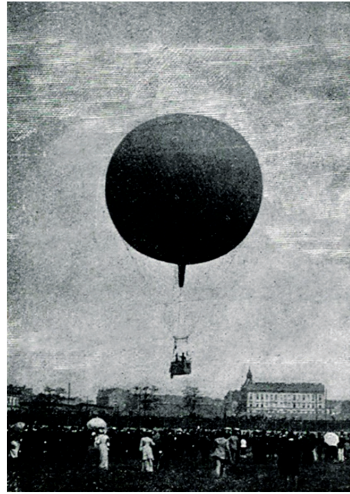
A legelső szemle, amellyel a *Közlöny*ben találkozunk, az 1877. évi 3. számban jelent meg, és a *Deutsche Heeres-Zeitung* alapján mutatja be a Párizs ostromakor alkalmazott léggömbposta történetét, illetve azt, hogy ennek hatására Metzben, Kölnben és Magdeburgban a németek léghajószolgálatot készítenek elő, s egyúttal galambposta-állomásokról is gondoskodnak [31, p. 254].

Ziegler Mór, a Ludovika Akadémia könyvtárosa francia források alapján számol be a bal-lonból készített első légi fotókról, amelyeket Rouen városáról fényképezett 1100 m magasból 1880. június 14-én Paul Desmarests. A képek jelentőségét tovább növeli, hogy nem kikötött, hanem szabadon repülő léghajóról készültek, ami egy, a fotós által szerkesztett elektromos zárral ellátott fényképezőgéppnek volt köszönhető, amely nagyon kis záridővel (1/100) tudott exponálni. Ezzel – írja Ziegler – bebizonyosodott, hogy fényképes felderítésre mozgó légi járművek is alkalmasak. Az esemény betetőzéséként a léghajó egyik utasa mintegy 1000 m-ről hajtott végre „hullernyő” segítségével sikeres ugrást [32, pp. 523–525].

Az 1890. évi 11. számban olvasható először tudósítás a Monarchia első katonai léghajós kísérleteiről. A cikk beszámol a Radetzky és a Budapest nevű ballonok sikeres repüléséről [33, p. 843], majd egy év múlva már a második katonai léggömbvezetői tanfolyam megindításáról szól a híradás [34, p. 901]. Dacára annak, hogy 1893-ra a Katonai Aeronautikai Intézet telephelye is elkészült, a Német Birodalomban úgy ítélték meg, hogy Bécs a léggömbök helyett inkább az *ornithopter* típusú repülőgépek felé fordul. A *Neue Militärische Blätter* szerint az osztrák–magyar kísérletek célja repülőgép megalkotása: „a katonai célokra legalkalmasabb, tisztán mechanikai úton előállítandó repülőgép főkövetelménye bizonyára abban rejlik, hogy a továbbmozgásra és kormányzásra szolgáló készülék úgy a vízszintes, mint merőleges emelkedésre a legkönnyebb és legbiztosabb kezelhetőség mellett a legteljesebben használható legyen.” [35, p. 98] A léghajós kiképzések azonban tovább folytatódtak, s 1900-ban felhívást tettek közzé a jelentkezők számára. Ebből megtudható, hogy február 25-ig kell eljuttatniuk a jelentkező tisztek kérvényeit a hadügyminisztériumba. A feltételek: „három évi csapatszolgálat, melyből két év tiszti rangban az alosztálynál, ügyesség látrajzok készítésében, erőteljes testalkat, ügyesség a tornázásban, igen jó látóképesség gyors tájékozással, 80 kg-ot meg nem haladó testsúly” [36, p. 193], továbbá felméri a jelentkezők lovaglótudását, és kizárólag olyanokat várnak, akik háború esetén behívhatók lesznek, azaz nem törekszenek olyan pályára később, ami ezzel ellentétes.

A Monarchia léghajós osztályát részletesen szintén 1900-ban mutatja be a lap. Schrodtr Rudolf tüzér főhadnagy leírása alapján a korban a ballonpilótákat felelőtlen hazardőrökként képzelte el a közvélemény, akiket „az életbiztosító társaságok szabályzatai, a melyek a »léghajósokat, állatszélidítőket és akrobatákat« egy fokra helyezik és nem fogadják el őket, a vakmerőket, biztosításra!” [37, p. 711] Holott – állítja a szerző – egyre jobbak a statisztikák és a technológia is. Utóbbit bemutatja, így megismerhetjük a Monarchiában alkalmazott ballonokat is. Ezek anyaga lehet pongé selyem, perkál és bélhártya is (utóbbi birkabél, amit viszont csak ragasztani lehet és nehezen viseli a magas páratartalmat). Az anyagot gumiol-dattal kezelik a nyomás fenntartása végett. A túlnyomás ellen rögzített ballonoknál magától működő „szellentyű”, szálló gömböknél pedig „appendix” található, a léggömbök felső részén mindkét esetben kötéllel szabályozható szelep van, amellyel leereszthető a jármű. Ez a szelep szolgál a függőleges süllyedéshez, emelkedést pedig ballasztok ledobásával lehet elérni. Végül pedig egy „feltépő készülék” is tartozéka a ballonoknak, amely a burkolaton a felső ponttól a középvonalig tartó hasadék, amit egy széles szövetszalaggal belülről ragasztottak le, felső végén egy szakítókötel található, amely a léggömb azonnali leeresztésére szolgál veszély esetén. A 130 cm magas falú gondola spanyolnádból készül, a léggömbhöz tartozik továbbá vonókötél, barométer, termométer, iránytű, térképek és távcsövek. 1898-ig a bécsi intézet csak gömbballont használt, azonban ez már 10 m/s szélerősségnél is nehezen szállt fel és erősen hánykódott. Ezután bevezették a Siegsfeld-féle sárkányballont is, amely kapszula formájú, és egy vitorla segítségével szél ellen fordítható. A közös hadsereg léghajós osztálya kétféle osztagot szerelt fel: táborig (1 léggömb, 1 sárkányballon, 5 tiszt, 50 katona, 8 négyfogatú kocsi, ebből 6 kocsin vaspalackokba töltött hidrogénnel, egy-egy kocsin pedig a ballonok, 600 m-nyi kötélzet és egyéb szerelvények; a legénység a kocsikon közlekedik, a tisztek lovasítva vannak) és várbeli léghajós osztagot. A táborig osztagokat a tüzérség mögé, elővédartalékhoz osztják be: az egység parancsra lekanyarodik, felfejlődik, megtölti gázzal a ballont és felbocsátja, ehhez 30 percre van szükség. A ballon telefontal kommunikál a földdel, a kábelt a kocsihoz kötött rögzítőkötélen vezetik le, a ballon mozgatása pedig a kocsihoz történik. A tüzérségtől

legalább 5000 lépésnyire kell elhelyezni biztonsági okokból az osztagot. A felszállás végén levonják a ballont, és egy gödörben vagy más védett helyen kötik le, egy töltés ugyanis 3-4 napig kitart [37, pp. 711–714].



6. ábra

A magyar Turul szabad léggömb felszállása Budapesten [30]

A *Közlönyben* a repülőgép-kísérletek közül a szerzőket leginkább az automata géppuskát 1883-ban megalkotó Hiram Maxim elképzelései érdekelték, erre utal, hogy 1894 és 1906 között hat különböző cikkben és tudósításban¹⁸ is beszámolnak a feltaláló terveiről, aki amellet, hogy jelentős összegeket áldozott a kísérleteire, gondoskodott arról is, hogy ezeknek megfelelő visszhangjuk legyen – ilyen és ehhez hasonló mondatokkal: „Nem fontos és nem is célszerű utánozni a madarakat [...] Adjatok nekünk egy motort, és mi nagyon hamar sikeres repülő masinával örvendeztetünk meg titeket.” [38, p. 15]

5. Könyvismertetések

A *Közlönyben* található könyvismertetések mindig az aktuális, nemzetközi szakirodalmi állapotokat tükrözték. Így van ez a repüléstudomány vonatkozásában is, ahol 8 ilyen tétellel találkozhatunk 1887 és 1894 között. Az ismertett kötetek közül 2 cím francia, a többi pedig német nyelvű (3 bécsi és 3 németországi megjelenésű könyv). Hét esetben ismert a könyv-szemle szerzője, aki ugyanaz a személy: Müller Hugó százados.

¹⁸ „A léghajózás terén fontos vívmányokat jeleznek a francia lapok,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 21. évf. 11. sz. pp. 1021–1022. 1894; „Katonai léghajózás,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 21. évf. 11. sz. p. 1061. 1894; „Megjegyzések a repülőgépekről,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 22. évf. 4. sz. pp. 382–388. 1895; Müller Hugó, „A természettudományok legújabb haladása a háború szolgálatában,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 23. évf. 2. sz. pp. 59–72. 1896; „A Maxim-féle repülőgép,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 23. évf. 2. sz. p. 144. 1896; Dondon Olivér, „Adatok a kormányozható léghajó kérdésének megítélésére,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 33. évf. 2. sz. pp. 170–187. 1906.

- A szemlézett művek a következők (a címadatok után zárójelben a *Közlöny* lapszáma):
- Hermann W. L. Moedebeck, *Die Luftschiffahrt in ihrer neuesten Entwicklung*. Berlin, Mittler, 1887. (LAK 1887/11.)
 - Ernst Wechmar, *Der aviatische oder dynamische Flug. Ein Beitrag zur neueren Luftschiffahrtkunde*. Wien, Spielhagen und Schurich, 1888. (LAK 1888/5.)
 - H. de Graffigny, *Die Luftschiffahrt und die lenkbaren Ballons*. Leipzig, C. Reissner, 1888. (LAK 1888/10.)
 - Georges Espitallier, *Les ballons et leur emploi á la guerre*. Paris, G. Masson, [1889]. (LAK 1889/3.)
 - Hermann Hoernes, *Die Luftfahrzeuge der Zukunft für Personen- und Waaren-Verkehr, und die Aussichten der Luftschiffahrt*. Wien, A. Hartleben, 1891. (LAK 1891/4.)
 - Hermann Hoernes, *Über Ballonbeobachtungen und deren graphische Darstellung mit besonderer Berücksichtigung meteorologischer Verhältnisse*. Wien, A. Hartleben, 1892. (LAK 1892/10.)
 - Karl Stadelmann, *Die neuen Verkehrsmittel im Kriege. Die Luftschiffahrt in den Militärstaaten Europa's und ihre praktische Verwendung im Kriegsfall*. Berlin, Ernst Siegfried Mittler, 1892. (LAK 1893/1.)
 - Émile Cyprien Driant, *La guerre en ballon*. Paris, [1893]. (LAK 1894/1.)

Felhasznált irodalom

- [1] Szani F.: „A Szolnoki Repülőtisztai Főiskola története (1949–1991),” in *A magyar katonai vezető- és tisztképzés története. A millecentenárium alkalmából rendezett tudományos konferencia anyaga*. 1996. október 8–9. Lengyel F., Szántó M. szerk. Budapest, Honvédelmi Minisztérium Oktatási és Tudományszervező Főosztály, 1996, pp. 192–208.
- [2] Olasz L.: „Repülőtiszt-képzés Magyarországon (1939–1945),” in *Elméletek és ötletek a módszertani változáshoz*. Karlovitz János Tibor szerk. Komárno, International Research Institute, 2023, pp. 17–25.
- [3] Négyesi L., *Ludovika*. Budapest, Ludovika, 2021.
- [4] „A Ludovica Academia közlönye,” *Ellenőr*, 5. évf. 309. sz. p. 2. 1873. december 27.
- [5] Mészáros Z., „A Ludovika Akadémia Közlönye a növendékek korában (1884–1897),” *Honvédségi Szemle*, 152. évf. 5. sz. pp. 92–106. 2024. Online: <https://doi.org/10.35926/HSZ.2024.5.6>
- [6] Mészáros Z., „A Ludovika Akadémia Közlönye a századfordulón (1898–1907),” *Honvédségi Szemle*, 153. évf. 2. sz. pp. 118–133. 2025. Online: <https://doi.org/10.35926/HSZ.2025.2.10>
- [7] Dezséri Bachó L. szerk., *A Magyar Kir. Honvéd Ludovika Akadémia története*. Budapest, Ludovika Akadémia, 1930.
- [8] NN [Nemzeti Névtér], *Személynévtér*. Online: <https://magyarnemzetinevter.hu/person/>
- [9] Szinnyei J., *Magyar írók élete és munkái*. Online: <https://mek.oszk.hu/03600/03630/>
- [10] Istvánffy M., „A Ludovika Akadémia Közlönyének munkatársai,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 26. évf. 6–7. sz. pp. 610–709. 1899.
- [11] Szakály S., „Adalékok Kemény Ferenc életútjához. Katonai szolgálatának időszaka, 1880–1893,” in *Kemény Ferenc és kora*. Szabó L., Szóts G. szerk. Budapest, Magyar Sporttudományi Társaság, 2011, pp. 9–15.

- [12] Pervulescó S., „A léghajózás és hadi célokra felhasználása,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 21. évf. 6–7. sz. pp. 659–683. 1894.
- [13] Bödök Zs., *Magyar feltalálók a repülés történetében*. Dunaszerdahely, Nap, 2002.
- [14] Straub S., „A léghajó a hadászat szolgálatában,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 8. évf. 7. sz. pp. 523–529. 1881.
- [15] Straub S., „A tudományos légutazásokról,” *Természettudományi Közlöny*, 11. évf. 120. sz. pp. 289–303. 1879.
- [16] Lits G., „Vence ostroma 1849,” *Hadtudomány*, 19. évf. E-sz. pp. 1–16. 2009. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/hadtudomany/article/view/6400>
- [17] Horváth Á., *A hadirepülés évszázada*. Budapest, Zrínyi, 1968.
- [18] Nagel A., „A léghajózás és a háború,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 12. évf. 2. sz. pp. 81–111. 1885.
- [19] Dondon O., „Adatok a kormányozható léghajó kérdésének megítélésére,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 33. évf. 2. sz. pp. 170–187. 1906.
- [20] Müller H., „A léghajózás a hadviselés szolgálatában,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 14. évf. 3. sz. pp. 178–188. 1887.
- [21] Müller H., „A természettudományok legújabb haladása a háború szolgálatában,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 23. évf. 2. sz. pp. 59–72. 1896.
- [22] G. I. [Geöcze István], „A léghajók hadi alkalmazása,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 19. évf. 3. sz. pp. 272–295. 1892.
- [23] Nónay D., „Az orosz katonai léghajózás szervezete és a léghajós osztályok működése hadgyakorlatok alatt,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 20. évf. 1. sz. pp. 65–75. 1893.
- [24] Gondos L., „Felderítőballonok az Osztrák–Magyar Monarchia haderejében, 1890–1918,” *A Hadtörténeti Múzeum Értesítője*, 17. évf. 1. sz. pp. 11–37. 2017.
- [25] Mikoss A., „A katonai léghajózás,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 30. évf. 2. sz. pp. 222–237. 1903.
- [26] Mikoss A., „A léghajó a várban,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 28. évf. 7–8. sz. pp. 611–620. 1901.
- [27] Csiffáry G., „Schwarz Dávid kormányozható léghajója,” *Budapesti Levéltári Mozaikok*, 4. sz. pp. 1–14. 2022. Online: <https://doi.org/10.56045/BLM.2022.4>
- [28] J. Batchelor, M. V. Lowe, *A repülés enciklopédiája 1848–1939*. [Budapest], Gabo, 2005.
- [29] Czékus Z., „A léghajó harctéri alkalmazása,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 33. évf. 4. sz. pp. 397–413. 1906.
- [30] Sgardelli C., „A léghajózás fejlődése az utolsó években,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 34. évf. 5. sz. pp. 781–794. 1907.
- [31] „A léghajózás Páris ostroma alatt,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 4. évf. 3. sz. p. 254. 1877.
- [32] Ziegler M., „A léghajó a hadászat szolgálatában,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 7. évf. 10. sz. pp. 523–525. 1880.
- [33] „Katonai léghajózás,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 17. évf. 11. sz. p. 843. 1890.
- [34] „Léghajós tanfolyam,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 18. évf. 8–9. sz. p. 901. 1891.
- [35] „Die angestebte Wendung betreffend Luftschiffahrtsmittel für militärische,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 20. évf. 1. sz. pp. 97–98. 1893.

- [36] Isépy L., „Jelentkezés a katonai léghajózási intézethez,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 27. évf. 2. sz. p. 193. 1900.
- [37] Schrodt R., „A léghajózásról általában és a hadseregben,” *Ludovika Akadémia Közlönye*, 27. évf. 6–7. sz. pp. 711–714. 1900.
- [38] R. G. Grant, *A repülés évszázada*. [Budapest], Magyar Könyvklub, 2003.

Aviation and Flying Machines in the First Hungarian Military Journal Between 1877 and 1907

How and when did aviation appear in the Hungarian military press? What aeronautical inventions and inventors did Hungarian soldiers read about in the late 19th and early 20th century? The paper examines the traces of aviation – and especially its military applications – in the first consecutively published Hungarian military journal, the Ludovika Academy Bulletin.

Keywords: *Royal Hungarian Defence Force, Ludovika Academy, Ludovika Academy Bulletin, military scientific journal, history of aviation, airship, balloon, airplane*

Mészáros Zoltán
főigazgató
Nemzeti Közszerológiai Egyetem
Egyetemi Könyvtár
doktori hallgató
Nemzeti Közszerológiai Egyetem
Hadtudományi Doktori Iskola
meszaros.z@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8812-2376

Zoltán Mészáros
General Director
Ludovika University of Public Service
University Library
PhD student
Ludovika University of Public Service
Doctoral School of Military Sciences
meszaros.z@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8812-2376

Horváth Gábor

Kibervédelmi kockázatértékelés a légi forgalmi irányításban: az európai metodika

A légi forgalmi szervezéssel összefüggő rendszerek (ATM) digitalizációja, a szolgáltatásorientált architektúrák és az adatmegosztásra épülő modellek bevezetése jelentősen növeli a rendszerek összetettségét és kibervédelmi kitérttségét. Jelen publikáció átfogóan elemzi a modern ATM-rendszerek kibervédelmi kihívásait, különös tekintettel a kockázatértékelési módszertanok (például SecRAM) gyakorlati korlátaira, a kommunikációs protokollok (ADS-B, CPDLC) sérülékenységeire, valamint az ellátási láncok és a rendszer-integráció által okozott dominóhatásokra. A tanulmány bemutatja a Horizon Europe SEC-AIRSPACE projekt innovatív megközelítését, amely nem új módszertan, hanem a meglévő kockázatkezelési eljárások kiegészítését célozza. A projekt fő újdonságai közé tartozik egy holisztikus ATM-taxonómia kidolgozása, a virtualizált környezetek és a humán tényezők figyelembevétele, valamint a dinamikus kockázatmonitoring bevezetése. Az eredmények hozzájárulnak egy kibereziliens ATM-ökoszisztéma kialakításához, amely képes a folyamatosan változó fenyegetettségi környezetben is fenntartani a légi közlekedés kiemelkedő biztonságát.

Kulcsszavak: kibervédelem, kibervédelmi kockázatértékelés, légiforgalom-szervezés, ATM, air traffic management

1. Bevezetés

A légiforgalom-szervezés (ATM¹) egy rendkívül összetett, globális léptékű infrastruktúra, amelynek elsődleges célja a légi forgalom biztonságos és hatékony áramlásának szavatolása [1]. Az ATM-rendszerek egyre szorosabb összekapcsolódása és növekvő komplexitása azonban új, rendszerszintű kockázatokat generál. Az új technológiák, mint az adatmegosztás-alapú szolgáltatási modellek, a szolgáltatásorientált architektúrák, valamint az adatok intenzív megosztása a különböző szereplők között, jelentősen átalakítják a jelenleg ismert ATM működését [2]. Ezek a fejlesztések ugyanakkor dinamikusabb légtér- és ATM-szolgáltatás-menedzsmentet igényelnek, amely a kibervédelmi fenyegetések új generációjának teszi ki a rendszereket. Amennyiben ezekre a fenyegetésekre nem megfelelően reagálnak, az akár katasztrofális következményekhez is vezethet [3].

¹ Air Traffic Management.

Jelen tanulmány célja, hogy analizálja a nemrégiben elindított Horizon Europe SEC-AIRSPACE² projekt megközelítését, amelynek középpontjában egy reziliens ATM-rendszer megvalósítása áll, különös hangsúlyt fektetve a kibervédelmi kockázatok mérséklésére és az érintettek kockázattudatosságának növelésére. Az eredmények figyelembevétele mellett további fontos célkitűzés a következtetések értékelése a katonai ATM vonatkozásában.

2. Kihívások

Az előző fejezetben hivatkozott SEC-AIRSPACE projekt az Európai Unió fiskális támogatásával rendelkező, feltáró jellegű (*Exploratory Research*) kutatás, amely a SESAR Digitális Európai Égbolt (Digital European Sky) program keretében, az úgynevezett *Virtualisation And Cyber-Secure Data-Sharing* zászlóshajó-kezdeményezés részeként fut 2023. szeptember 1. és 2026. február 28. között. Jelen fejezetben a projekt által feltárt kihívásokat elemezzük.

2.1. Az ATM-rendszerek kibervédelmi kockázatértékelése

A kibervédelmi kockázatértékelés mára általánosan elfogadott megközelítéssé vált a digitális információra, adatmegosztásra és szolgáltatásalapú architektúrára épülő ágazatokban, beleértve a kritikus infrastruktúrákat is [4]. A légi közlekedés és azon belül a dinamikus, integrált légiforgalom- és légtérmenedzsment (ATM) sem kivétel [5]. Európában az ATM-ágazat kutatás-fejlesztési (K+F) tevékenységeinek jelentős része a SESAR Joint Undertaking keretében zajlik. A szervezet kibervédelmi eljárásrendje kiemeli, hogy a biztonsági erőfeszítéseket a legérzékenyebb pontokra kell koncentrálni, és a kockázatértékelést már a K+F-fázisban el kell végezni, különösen technológiailag összetett architektúrák és új technológiák bevezetésekor [6].

A gyakorlatban alkalmazott ATM-kockázatértékelési módszerek azonban továbbra is széttagoltak, mivel nincs univerzális, egységesen elfogadott megoldás az ATM-rendszerek sokféleségére [7]. Az európai ATM K+F-projektek többsége a Security Risk Assessment Methodology (SecRAM) eljárást alkalmazza, amelyet a SESAR fejlesztett ki [6]. Hasonló megközelítéseket más szektorokban is használnak, például az ISO/IEC 27005 és a NIST SP 800-30 szabványokat [8]. Függetlenül a választott módszertantól, elengedhetetlen a rendszer architektúrájának és működésének teljes körű megértése, valamint a védendő kritikus eszközök azonosítása, ami előfeltétele a kockázatok helyes értelmezésének és a megfelelő ellenintézkedések kiválasztásának.

Egy nemrégiben publikált tanulmány szerint azonban a SecRAM-gyakorlók gyakran nehézségekbe ütköznek – különösen a kritikus eszközök azonosításában, valamint a releváns fenyegetések és kockázatok meghatározásában az általuk fejlesztett technológiák és folyamatok kapcsán [9]. További problémák is jelentkeznek az ATM-rendszerek komplexitásának növekedésével, különösen a virtualizált szolgáltatások terjedésével, amelyek keretében a rendszerek közötti határok elmosódnak [10]. Az Európai Unió Repülésbiztonsági Ügynöksége (EASA) és a Stratégiai Együttműködési Platform (ESCP) több szereplője olyan új javaslatot tett a szabályozási keret egyszerűsítésére és harmonizálására, amely nemzetközi együttműködést,

² Projekt ID: 101114635.

szervezetek közötti kockázatmegosztást és átfogóbb értékelési módszerek szükségességét hangsúlyozza [11].

A jelenlegi kiberkockázati modellek több szempontból is jelentős továbbfejlesztést igényelnek: folyamatszervezési, modellezésmetodológiai és átfogó rendszerszemléleti vonatkozásban egyaránt. Egyrészt a veszélyforrások rendkívül gyors ütemben változnak és fejlődnek, ami szükségessé teszi a kockázatbecslések folyamatos, valós idejű frissítését lehetővé tevő hatékonyabb módszertani megközelítéseket. Másrészt napjaink kiberfenyegetései már nem kizárólag az informatikai rendszerekre korlátozódnak, hanem komplex módon érintik a humán erőforrásokat és a kiberfizikai rendszerek teljes spektrumát is. Harmadrészt a jelenleg alkalmazott modellek jelentős része nem veszi kellő mértékben figyelembe a kézzelfogható és immateriális eszközök sebezhetőségét a teljes ellátási lánc valamennyi pontján. Tudományos szempontból kiemelendő, hogy a komplex rendszerek sebezhetősége több kritikus ponton is megmutatkozhat: a rendszereket üzemeltető humán tényezőkön, a kiberfizikai interfészeken vagy akár a beszállítói hálózat bármely elemén keresztül is kompromittálhatják rosszindulatú szereplők [12]. Az FP7 GAMMA projekt hangsúlyozza, hogy bármely ATM-biztonsági megoldásnak figyelembe kell vennie az új fenyegetések által okozott kockázatprofil-változásokat; egyetlen csomópont elleni támadás rövid idő alatt dominóhatással megbéníthatja az egész ATM-rendszert és a teljes légi közlekedési rendszert [13]. Az ilyen szempontokat a SecRAM jelenleg nem fedi le megfelelően, mivel alig vagy egyáltalán nem támogatja a kritikus eszközök azonosítását virtualizált környezetekben, a kibertámadások láncreakcióinak elemzését vagy a kockázatok dinamikus vizsgálatát.

A kibervédelmi kockázatértékelések ritkán történnek meg valós időben – jellemzően csak egy alkalommal, a rendszer fejlesztésekor és/vagy évente egyszer az üzembe helyezés után. A modern elvárások szerint a kockázatelemzési folyamatokat az eddigieknél lényegesen gyakrabban, optimális esetben valós idejű rendszerként szükséges működtetni, különösen azon ágazatokban, ahol magas fenyegetettséggel és kockázattal kell számolni. Ennek során jelenthetnek segítséget az automatizált technológiai megoldások – kiváltképp a mesterséges intelligencia (MI) alkalmazására épülő rendszerek – elsősorban a behatolásérzékelés, a kártékony programok azonosítása, valamint az ipari vezérlőrendszerek védelme terén. Mindazonáltal a mesterséges intelligencia alkalmazása a szisztematikus kockázatértékelési folyamatokban továbbra is relatíve újszerű kutatási és fejlesztési területnek tekinthető, különösen a légiforgalom-szervezés kontextusában. Az ATM-rendszerekben rejlő potenciális előnyök kiaknázása ugyanakkor különleges jelentőséggel bír, tekintettel e kritikus infrastruktúrák komplex biztonság követelményeire és társadalmi fontosságára.

2.2. Az ATM-rendszerek sebezhetőségei és fenyegetettségei

A jövő légi forgalmi irányításának víziója megnövelt rendszerszintű interdependenciát és szolgáltatási integrációt feltételez, amely lehetővé teszi a légi navigációs szolgáltatók (ANSP³), a légitársaságok, a repülőterek és a jövőbeni ATM-adatszolgáltatók⁴ számára az információk és szolgáltatások megosztását korábban nem ismert, innovatív módokon. Ez elkerülhetetlenül

³ Air Navigation Service Provider.

⁴ ATM Common Information Service Provider.

növeli az ATM-rendszerek potenciális kiberfenyegetettségét, mivel ezek a rendszerek korábban a zárt szabványok és az úgynevezett szigetüzem használata révén védtek a támadásokkal szemben. Az interoperabilitás növelése és a költségcsökkentés iránti igény fokozza a kereskedelmi forgalomban kapható (COTS⁵) alkatrészek alkalmazását, amelyeknek az integrációja új, összetett szolgáltatások vagy rendszerek létrehozása során komoly biztonsági kockázatot jelenthet. Az ATM egyik ismert példája az IP-protokollcsalád bevezetése a jövőbeni kommunikációs infrastruktúrában (FCI⁶). További kockázati tényező a különböző polgári és katonai szereplők, valamint a földön és az űrben telepített kommunikációs, navigációs és megfigyelőrendszerek közötti integráció [7].

Az elmúlt évtizedben egyre csak nőtt az ATM-rendszerek kibervédelmi sebezhetőségével összefüggő érdeklődés. Az úgynevezett etikus hackerek egy kutatócsoportja bemutatta, hogy mennyire könnyen és milyen olcsón lehet manipulálni az olyan meglévő, föld-levegő irányú biztonságkritikus adatátviteli protokollokat, mint például az ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) és a CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications) [14]. Ezen túlmenően már 2014-ben az IOActive nevű cég feltárta, hogy több SATCOM⁷-eszköz *firmware*-je súlyos sebezhetőségeket tartalmaz, amelyek lehetővé tehetik a támadók számára, hogy átvegyék az irányítást az adatkapcsolat felett, közvetlen veszélyt jelentve a légi közlekedés biztonságára [15]. Ehhez hozzájárul a különböző globális navigációs helyzetmeghatározó rendszerek (GNSS⁸) egyre gyakoribb zavarása, ami napjainkban komoly hatást gyakorol a légi forgalomra a Baltikum térségében [16].

2.3. A kibertámadások láncreakciós hatásai az ATM-rendszerekben

Általánosságban kijelenthető, hogy a légi forgalom szervezését irányító rendszerek fejlődése inkrementális, a kiberezilienciát nem, vagy nem kellő súllyal faktorizálták, és a tervezés során nem fektettek kellő figyelmet a globális összekapcsoltsággal összefüggő kihívások kezelésére [5]. Az utas- és áruforgalom növekményével együtt járó digitalizációs igények új rendszerek létrehozását indikálják, amelyek a működési hatékonyság növelését prioritizálják. Emellett az exponenciálisan növekvő adatforgalom új üzleti modellek megjelenését teszi lehetővé, amelyek csak más ágazatokkal való fokozott kapcsolat révén hasznosíthatók hatékonyan.

A légi forgalom hagyományos irányítórendszereinek fokozatos átállása a fejlettebb megfigyelő- és kommunikációs rendszerekre – modern adatátviteli hálózatokon keresztül – alapvetően alakítja át a légi közlekedési környezet biztonsági értékelését. Ez azonban az örökölt rendszereket – amelyeket inkább a repülésbiztonsági követelmények figyelembevétele mellett fejlesztettek – sebezhetővé teheti, és kézenfekvő támadási vektort biztosíthat a rosszindulatú aktoroknak [17].

Ez a rendszerintegráció kiterjesztett ellátási láncokat eredményez, amelyekben minden résztvevő a másik fél szolgáltatásaira és az ATM-szereplőkre, az ipari partnereikre és a kapcsolódó ellátási láncok közötti interakciókra van utalva. Ennek eredményeként az ellátási lánc biztonsága komoly kockázatot hordoz magában, mivel számos sebezhető pontot kínál

⁵ Commercial-Off-The-Shelf.

⁶ Future Communication Infrastructure.

⁷ Satellite Communications.

⁸ Global Navigation Satellite System.

rosszindulatú szereplők számára. Mindent figyelembe véve – a kiberfizikai rendszereket is beleértve – a hardver- és szoftverelemek összessége bizonyos mértékű támadási veszélynek van kitéve. Az ellátási lánc biztonságát ezért nem csupán a már működő rendszerekre, hanem minden olyan elemre is ki kell terjeszteni, amely az adott rendszer előállítását és működtetését valamilyen mértékben támogatja [4].

Az ATM-architektúrák és azok ellátási láncai eddig kevés figyelmet kaptak, pedig ezek alapos értékelése és megértése kulcsfontosságú a kiberkockázatok felmérésében. Ez lehetővé teszi a lehetséges láncreakciók hatásainak azonosítását, valamint a megfelelő megelőző és védelmi intézkedések meghozatalát.

2.4. Biztonsági intézkedések az ATM-rendszereket fenyegető veszélyek mérséklésére

A polgári légi közlekedés területén a kibervédelmet az ICAO Annex 17 szabályozza, amelyet Európában a közös követelményrendszert rögzítő rendelet, valamint a NIS2 irányelv ültet át a gyakorlatba, előírva a légi navigációs szolgáltatók számára a vonatkozó biztonsági követelményeket. Mivel az ANSP-k alapvető szolgáltatóknak minősülnek, számukra kötelező a NIS2 irányelv alkalmazása [18]. A szabályozási környezet összetett, ugyanakkor arra kötelezi a légi navigációs szolgáltatókat, hogy a biztonságot átfogó, holisztikus szemlélettel kezeljék, figyelembe véve az emberi tényezőket, a folyamatokat és a technológiai megoldásokat [19].

Azok az ATM-egységek, amelyek a SecRAM-módszertant alkalmazzák, a magas és közepes szintű kockázatok kezelésére általában a SESAR által kidolgozott minimum biztonsági intézkedések halmazából (MSSC⁹) választják ki a megfelelő védelmi stratégiákat [20]. Ez a megközelítés azonban problémákat vethet fel, mivel az MSSC elsősorban informatikai rendszerekre vonatkozó, magas szintű biztonsági kontrollokat tartalmaz, amelyek nem megfelelő alkalmazása akár biztonsági és/vagy védelmi összeférhetetlenségeket is eredményezhet az ATM-rendszereken belül. Emellett hiányoznak a világos iránymutatások arra vonatkozóan, miként lehet ellenőrizni, hogy a beszállítók valóban megvalósítják-e a szükséges biztonsági intézkedéseket, különösen a légi közlekedési ágazatban, ahol a külső szoftverszállítók számára alig, vagy egyáltalán nincs jogi kötelezettség a biztonságos szoftverek szállítására [21].

2.5. Személyre szabott kibervédelmi képzés és tudatosság az ATM-szervezetek számára

A kibervédelem hatékony megerősítése átfogó, holisztikus szemléletet kíván, amely nem csupán technikai biztonsági intézkedéseket alkalmaz a kockázatok csökkentésére, hanem a társadalmi, emberi és szervezeti tényezőket is figyelembe veszi a rendszerek védelme során. Jól ismert tény, hogy az emberi tényező jelentős szerepet játszik a kiberkockázatok kialakulásában: a kibervédelmi incidensek mintegy 95%-a emberi hibára vezethető vissza [22]. Ugyanígy a súlyosabb adatvédelmi események többsége is szervezeti, folyamatok vagy emberi

⁹ Minimum Set of Security Controls.

mulasztás eredménye. Ennek következtében számos kibertámadás kifejezetten az embereket célozza, kihasználva a felkészültség hiányát vagy az alacsony tudatosságot [23].

A modern kibervédelmi technológiák egyre inkább az automatizálásra, a mesterséges intelligenciára és fejlett logikai rendszerekre támaszkodnak annak érdekében, hogy támogassák vagy akár részben kiváltásák az emberi beavatkozást. Ugyanakkor a képzési módszerek fejlődése nem tart lépést ezekkel a technológiai újításokkal: mivel egyre többen dolgoznak hibrid vagy teljesen távmunkaalapú környezetben – légi forgalmi irányítás esetében virtualizált irányítóközpontokban [24] –, különösen fontos, hogy az ATM-szektorban dolgozók kibervédelmi tudatossága és általánosságban a biztonsági kultúra fejlődjön.

Habár jelenleg is zajlanak képzések és tudatosságnövelő programok a kockázatok méréséklése érdekében, ezek módszertani fejlettsége gyakran elmarad a kívánatostól. A főként hagyományos oktatási formák – például tanfolyamok vagy képzési pályák – csak korlátozottan kapcsolódnak a valódi kockázatokhoz, így nehezen mérhető, hogy mennyire járulnak hozzá a tényleges kockázatsökkentéshez [25]. Az ATM-rendszerekben a valós légi forgalmi helyzetek szimulációja már a gyakorlati képzés része, azonban – különösen katonai környezetben – ritka, hogy ezek a szimulációk kiberfenyegetéseket is tartalmazzanak.

3. Előretékiítés: a SEC-AIRSPACE-megközelítés

Az előzőleg bemutatott kihívások kezelése érdekében a SEC-AIRSPACE projekt a következő, egymásra épülő stratégiai célkitűzéseket határozta meg:

1. a jelenlegi és jövőbeli légi forgalmi irányítási rendszerek kibervédelmi kockázatkezelési mechanizmusainak szisztematikus továbbfejlesztése és optimalizálása;
2. az ATM-ökoszisztémabeli szereplők kibervédelmi tudatosságának és érettségi szintjének célzott növelése, különös tekintettel a humán tényezőkre.

A projekt hosszú távú stratégiai víziója egy olyan kiberreziliens légi forgalmi irányítási rendszer megvalósítása, amely hatékonyan kezeli a virtualizációból eredő kockázatokat, valamint az ATM-infrastruktúra komponensei és az érintett szereplők közötti egyre intenzívebbé váló adatmegosztásból fakadó biztonsági kihívásokat. E rendszer kialakítása során kiemelt figyelmet kap a technológiai megoldások és a humán tényezők szinergiájának szavatolása, valamint az európai légterhasználat biztonságának komplex megközelítése.

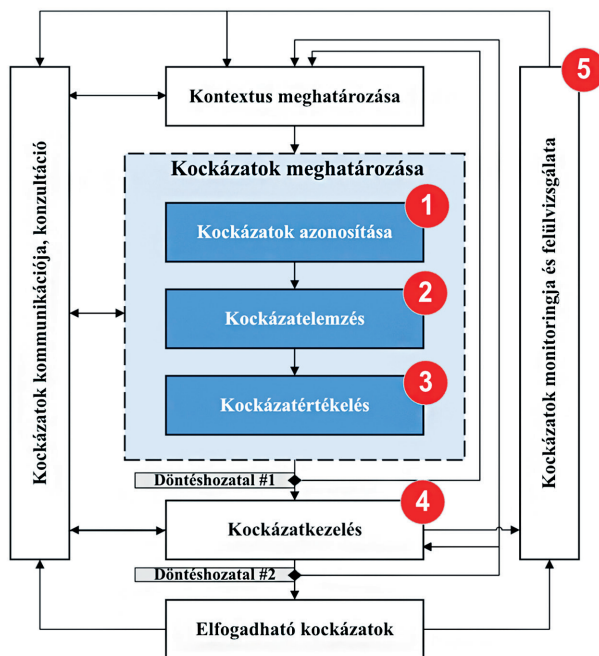
3.1. A kibervédelmi kockázatkezelés fejlesztése

Az 1. ábrával szemléltetett SEC-AIRSPACE projekt célja, hogy a jelenleg alkalmazott módszertanokat és bevált gyakorlatokat olyan kulcsfontosságú építőelemekkel egészítse ki és fejlessze tovább, amelyek hatékonyabbá teszik a kibervédelmi kockázatok kezelését az ATM területén. A projekt nem egy teljesen új módszertan kidolgozására törekszik, hanem olyan kiegészítések megalkotására, amelyek révén pontosabb és megbízhatóbb becslések készíthetők a jövőbeli ATM-forgatókönyvek kockázataira vonatkozóan.

A SEC-AIRSPACE elsősorban egy olyan átfogó taxonómiát dolgoz ki, amely a jövőbeni ATM-rendszerek elemeinek modellezését szolgálja. Ez a taxonómia holisztikus szemléletet

követ, lehetővé téve az ATM-ellátási lánc teljes körű ábrázolását, beleértve mind a kézzelfogható, mind az immateriális eszközöket, továbbá az emberi, eljárási és szervezeti tényezőket is. Emellett támogatja az összetett rendszerek, szolgáltatásorientált architektúrák, virtualizált elemek, valamint az ATM-szereplők közötti adatmegosztási interfészek megfelelő leírását. A cél, hogy a kiberkockázatok értékelése az összetett ATM-rendszerekben pontosabbá váljon, és lehetőség nyíljon a láncreakciós hatásokkal járó kibertámadások következményeinek részletes elemzésére is.

Másodsorban, a korszerű kibervédelmi kockázatkezelési életciklusokat holisztikus módon kell elemezni, vagyis minden lehetséges kockázati forrást figyelembe kell venni, beleértve az informatikai rendszerek integrációjából származó, a kiberfizikai és a vezérlőrendszerekhez, valamint az emberi tényezőkhöz kapcsolódó kockázatokat is. Egy átfogó kockázatértékelésnek minden típusú vagyonelemre ki kell terjednie. Például a HERMENEUT európai uniós projekt rámutatott arra, hogy az immateriális javak – mint a márka, a hírnév vagy a humán tőke – kiemelt jelentőségűek [26]. A DOGANA projekt pedig a humán kockázatok úgynevezett *social engineering*¹⁰ alapú becslésére dolgozott ki módszertant [27]. A SEC-AIRSPACE ennek megfelelően iránymutatásokat készít az ATM-rendszerek sérülékenységeinek és gyengeségeinek azonosítására, különös tekintettel az emberi, eljárási és szervezeti tényezőkre.



1. ábra

Az ISO/IEC 27005 ajánlás SEC-AIRSPACE-szemlélet szerinti értelmezése [a szerző]

¹⁰ Az informatikában a *social engineering* (fordításban néha társadalommérnökség vagy pszichológiai befolyásolás) olyan támadási módszert jelent, ahol nem valamilyen technológiai sebezhetőséget használnak ki, hanem a számítógépet használó személyt tévesztik meg.

Harmadsorban, az ATM-rendszerek magas fokú összekapcsoltsága miatt a virtualizációból és a láncreakciós hatásokból – vagyis más szervezeteket, illetve szektorokat érintő másodlagos következményekből – eredő kockázatokat értékelni kell. A SEC-AIRSPACE áttekinti az ilyen események megelőzésére alkalmazott meglévő megközelítéseket, és új elemzéseket nyújt az azonosítási, összefüggés-feltárási és kockázatcsökkentő mechanizmusokról. A projekt egyik fő hozzájárulása egy olyan modell lesz, amely az ATM-rendszerkomponensek, illetve az ATM-rendszerek és más – különösen kritikus – infrastruktúrák közötti függőségeket vizsgálja.

Negyedik lépésként, a kibervédelmi kockázatok azonosítása után célzott biztonsági intézkedéseket kell bevezetni a kockázatok elfogadható szintre történő csökkentése érdekében. A SEC-AIRSPACE ennek támogatására új, ajánlott biztonsági intézkedéscsomagot dolgoz ki az ATM-rendszerek számára, amely az előző lépésekben feltárt fenyegetések mérséklésére szolgál. Ezek az intézkedések a meglévő legjobb gyakorlatokon – például az ISO/IEC 27005 szabványon vagy az MSSC ajánlásain – alapulnak, de igazodnak a jövőbeli ATM-rendszerek speciális igényeihez.

Végül a SEC-AIRSPACE célja a kockázatok folyamatos nyomon követésének és felülvizsgálatának fejlesztése egy dinamikus monitorozási és felülvizsgálati módszer bevezetésével, amelyet kifejezetten az ATM-rendszerek sajátosságaira szabnak. Ez a módszer az ATM-rendszerek adatmodelljeit használja bemeneti adatként, majd ezeket sémaszerűen kockázatértékelési algoritmusokká alakítja, amelyeket kockázati indikátorokhoz rendel. Ennek eredményeként lehetővé válik a kockázati szintek dinamikus mérése és megjelenítése.

3.2. A kibervédelmi tudatosság és érettség növelése

A SEC-AIRSPACE projekt keretében a People Analytics (PA) módszertanát alkalmazzák a légiforgalom-szervezés vonatkozásában, ami lehetővé teszi a személyre szabott, kontextusérzékeny képzési programok kialakítását [28]. A People Analytics és a Learning Analytics integrációja révén pontosan meghatározható, hogy mely tudásterületek, munkakörök és képzési módszerek járulnak hozzá a leghatékonyabban a kibervédelmi kultúra fejlesztéséhez [29]. Az így kialakított rendszer elősegíti a humán eredetű kockázatok csökkentését, valamint célzott, a munkavállalói csoportok sajátosságaihoz igazított képzési javaslatokat kínál. A folyamat főbb lépései az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- A kritikus eszközök és a szükséges tudás meghatározása: a SecRAM-módszertan alkalmazásával azonosítják azokat a legfontosabb eszközöket, amelyekhez kapcsolódóan megállapítják a szükséges ismereteket és készségeket.
- Persona-modellek kialakítása: a humán erőforrás-adatok és az információbiztonsági értékelések alapján meghatározzák a különböző alkalmazotti csoportokat, valamint azok kockázati profilját.
- A People Analytics módszertan alkalmazása: a tanulásmenedzsment rendszeréből származó egyéni képzési adatokat, a humán erőforrás vonatkozásában keletkezett információkat, valamint az ATM-szervezet képzési katalógusát integrálják.
- Képzési javaslatok kidolgozása: az elemzés eredményeként természetes klasztereket és személyre szabott képzési javaslatokat alkotnak meg, amelyek a legmagasabb kockázatu területekre fókuszálnak.

- Képzési szolgáltatók bevonása: a megalkotott képzési javaslatok átadhatók a képzést lebonyolító szervezeteknek, amelyeknek a visszajelzéseivel tovább tökéletesíthetik az információbiztonsági értékelési módszertanokat.

Ez a komplex megközelítés biztosítja, hogy a képzési folyamatok valóban a szervezet kockázati profiljához igazodjanak, és a humán tényezők figyelembevételével növeljék az ATM-szektor kibervédelmi érettségét.

3.3. A projekt esettanulmányai

A SEC-AIRSPACE projekt esettanulmányai több szempontból is jelentős szerepet töltenek be a kutatásban. Egyrészt megalapozzák és kontextusba helyezik a vizsgálati tevékenységeket, másrészt lehetőséget biztosítanak a projekt során elért kulcsfontosságú eredmények validálására. Emellett az esettanulmányok kiemelt fontosságúak a projekt eredményeinek bemutatása és tudományos kommunikációja szempontjából is.

Az első esettanulmány a légi forgalmi irányítók és pilóták közötti, kezdőponttól végpontig tartó adatáramlást vizsgálja egy jövőbeli, 4D trajektória alapú¹¹ üzemeltetési forgatókönyv keretében. Ebben a modellben a hagyományos hangalapú utasításokat digitális üzenetküldés váltja fel, amelyhez nyilvánosan elérhető, IP-alapú kommunikációs infrastruktúrákat alkalmaznak. A második esettanulmány egy virtuális irányítóközpont koncepcionális architektúrájának elemzésére fókuszál, amely a SWIM¹² alapelvei szerinti adatcsere-protokollokat, valamint nyílt, szolgáltatóorientált architektúrákat használ.

Mindkét esettanulmány olyan ATM-forgatókönyvet mutat be, amely digitális infrastruktúrára és korszerű szolgáltatásnyújtásra épül, ezáltal új típusú kibervédelmi fenyegetéseket és kockázatokat vet fel. Ezek az esetek egyúttal szorosan illeszkednek a SESAR Digitális Európai Égbolt fejlesztési víziójához, hozzájárulva a jövő légiforgalom-irányítási rendszereinek biztonságos és innovatív kialakításához.

3.4. Katonai ATM-vonatkozások

A SEC-AIRSPACE projekt kontextusában különös figyelmet érdemel a katonai légi forgalmi és légvédelmi irányítás, valamint a polgári ATM-rendszerek közötti interakció, amely további kibervédelmi kihívásokat generál. A két rendszer integrációja jelentős komplexitásnövekedést eredményez, különösen a jelenlegi európai geopolitikai helyzetben, ahol a légterekkel kapcsolatos biztonsági követelmények fokozottan előtérbe kerültek.

A katonai légi járművek üzemeltetése során három meghatározó korlátozási tényező azonosítható, amelyek jelentős mértékben befolyásolják a kibervédelmi kockázatok jellegét

¹¹ Egy légi jármű 4D trajektóriája három térbeli dimenzióból, valamint a negyedik dimenzióként értelmezett időből áll. Ez azt jelenti, hogy bármilyen kérés a trajektória (vagy pálya) torzulásának tekinthető, ugyanúgy, mint egy magasságváltozás vagy a vízszintes pozíció módosulása. A légi forgalmi irányítók taktikai beavatkozásai ritkán veszik figyelembe a teljes pályára gyakorolt hatást, mivel az előrettekintési idő viszonylag rövid, jellemzően körülbelül 20 perc.

¹² System Wide Information Management.

és kezelhetőségét. Elsőként kiemelendők az intézményi korlátozások, amelyek értelmében a katonai repülőeszközökre nem teljeskörűen alkalmazhatók a polgári légi közlekedés szabályozói, tekintettel arra, hogy ezen eszközök elsődleges rendeltetése az adott állam szuverenitásának biztosítása. Másodsorban az operatív korlátozások kontextusában megállapítható, hogy a védelmi és biztonsági fenyegetettség olyan műveleti imperatívuszokat generálnak, amelyeknek a katonai légi járművek esetében maradéktalanul érvényesülniük kell, ami az ATM-intézkedések vonatkozásában speciális kezelési protokollokat és körültekintő megfontolásokat tesz szükségessé. Harmadsorban számításba kell venni a technikai korlátozásokat, amelyek következtében a katonai repülőeszközök műszaki felszereltsége küldetésorientált, így az ATM, valamint a kommunikációs, navigációs és megfigyelési rendszerek fedélzeti implementációja egyes esetekben objektív korlátokba ütközhet.

A polgári-katonai együttműködés kulcsfontosságú a jövőbeli ATM-rendszerek rezilienciájának biztosításában. A MITRANO¹³ program keretében tesztelt Mission Trajectory koncepció célja, hogy harmonizálja a katonai műveleti követelményeket a polgári légi forgalmi szolgáltatásokkal. A missziótrajektória definíció szerint minden katonai művelethez egyedileg meghatározott és minden repülésre egyeztetett útvonal, amellyel összefüggésben a felhasználó – vagyis ebben az esetben a katonai légi forgalom – vállalja, hogy az egyeztetett útvonalat le is repüli, és ezért cserébe a légi navigációs szolgáltató és az érintett repülőtér kötelezettséget vállal az útvonal támogatására. A MITRANO tapasztalatainak függvényében a civil-katonai interakció számtalan potenciális biztonsági problémát vet fel, amelyek közvetlen kibervédelmi vonatokkal rendelkeznek:

- A chicagói egyezmény nem vonatkozik az állami légi járművekre [30], így a katonai személyzet nincs mindig megfelelően felkészítve a polgári légi forgalmi irányítás szabályaira és eljárásaira. Hasonlóképpen, a polgári irányítók általában nem ismerik a katonai légi forgalmi irányítási eljárásokat.
- Koordinációs problémák: amennyiben egy másik állam katonai légi járművei az államhatárhoz közel tevékenykednek, a kommunikációs lánc szükségtelenül hosszúvá válhat. Még a belföldi katonai tevékenységek során is előfordulhat, hogy a polgári irányítók nem tudják könnyen beszerezni a szükséges információkat a civil és katonai egységek közötti alacsony interoperabilitási szint miatt [31].
- A nemzetközi vizek feletti műveleteket érintő eltérő szabályozások jelentős bizonytalanságokat okozhatnak, különösen a NOTAM-ok helytelen közzététele esetén [32].

A kibertér és a légtér biztonságának konvergenciája új, integrált szemléletmódot követel meg. A korszerű katonai légi járművek fejlett avionikai rendszerekkel vannak felszerelve, amelyek működése nagymértékben támaszkodik összekapcsolt hálózatokra a navigáció, a kommunikáció, valamint a fegyverrendszerek irányítása során. Az ilyen rendszerek elleni kibertámadások potenciálisan veszélyeztethetik a műveleti képességeket, illetve a küldetések sikeres végrehajtását. Ennek következtében a katonai szervezetek robusztus kibervédelmi

¹³ A Mission Trajectory in ATC and Network Management Operations projekt célja olyan megoldások kidolgozása, amelyek támogatják a trajektóriák kezelését, valamint a hálózati szintű és légitforgalom-irányítási műveletekben a közös döntéshozatalt, beleértve a katonai légtérhasználat fejlett tervezési elveit is.

intézkedéseket alkalmaznak – beleértve a tűzfalakat, a behatolásérzékelő rendszereket és a titkosítási protokollokat – a kritikus légi közlekedési infrastruktúra védelme érdekében.

A SEC-AIRSPACE projekt keretében a katonai és polgári légiforgalom-irányítási rendszerek integrációja kiemelt jelentőségű. A kibervédelmi kockázatok értékelése során elengedhetetlen figyelembe venni a hadműveleti követelményeket, a katonai légtérhasználat dinamikus jellegét, valamint az eltérő szabályozási környezetből fakadó sajátosságokat. Az Európai Unió által támogatott kezdeményezés holisztikus kockázatértékelési megközelítése lehetővé teszi a civil és katonai rendszerek közötti interfészekben keresztül jelentkező biztonsági kihívások azonosítását és kezelését. Ezáltal biztosítható, hogy a jövő digitális európai légtere képes legyen mind a polgári, mind a katonai felhasználók igényeit harmonikusan integrálni, miközben a kibervédelem megfelelő szintje is garantált marad.

4. Következtetések

A légiforgalom-szervezés és ezen belül a légi forgalmi irányítás környezete napjainkban egyre komplexebb struktúrárt mutat. Az új piaci szereplők megjelenése, a kibővült szolgáltatási paletta, az integrált technológiai megoldások térhódítása, a virtualizációs folyamatok és a fokozódó adatmegosztási gyakorlatok bevezetése következtében az ATM-rendszerek és azok kritikus infrastrukturális elemei korábban nem tapasztalt kiberfenyegetéseknek és biztonsági kockázatoknak vannak kitéve. A légi közlekedési rendszerek megfelelő védelmének szavatolása érdekében az üzemeltetőknek, legyen az katonai vagy polgári, rendszeres és módszeres biztonsági kockázatelemzést szükséges végezniük, majd az azonosított kockázati tényezők mérséklésére célzott védelmi intézkedéseket kell implementálniuk.

A következtetések során érdemes hangsúlyozni, hogy a technológiai megoldások – így a különféle biztonsági kontrollmechanizmusok – önmagukban nem elégségesek a kiberfenyegetések hatékony elhárításához. Abban az esetben, ha a védelmi rendszerek kompromittálódnak, az üzemeltetőknek képesnek kell lenniük a jogosulatlan behatolások időben történő észlelésére, a személyzet azonnali riasztására, a káros következmények hatékony lokalizálására, valamint a meglévő vészhelyzeti tervekre alapozott helyreállítási és kárcsökkentő intézkedések haladéktalan foganatosítására. A kiberreziliencia megteremtése ezért átfogó, holisztikus megközelítést igényel a biztonsági kockázatmenedzsment területén, amelyben fontos az üzemeltető személyzet tudatosságának fejlesztése és célirányos képzése.

A SEC-AIRSPACE projekt legjelentősebb hozadéka a kiberreziliencia szintjének számottevő növekedése lesz; a rendszerszintű, holisztikus kiberbiztonsági kockázatkezelési metodika alkalmazásával a kibertámadások korai szakaszban történő felismerésének és elhárításának valószínűsége jelentősen fokozódik. Hosszabb időtávlatban a projekt eredményei hozzájárulnak ahhoz, hogy a polgári és a katonai ATM-szolgáltatások még kibertámadások vagy a digitális információs lánc váratlan zavarai esetén is biztonságosan működhessenek, garantálva ezáltal, hogy a légi közlekedés a jövőben is megőrizhesse kiemelkedő pozícióját a legbiztonságosabb közlekedési formák sorában.

Felhasznált irodalom

- [1] Palik M., *A repülésirányítás alapjai*. Budapest, Dialóg Campus, 2018.
- [2] T. De Zan, F. d'Amore, F. Di Camillo, „The Defence of Civilian Air Traffic Systems From Cyber Threats,” *Instituto Affari Internazionali*, 2015. Online: <https://www.iai.it/sites/default/files/iai1523e.pdf>
- [3] E. Harison, N. J. Zaidenberg, „Survey of Cyber Threats in Air Traffic Control and Aircraft Communications Systems” *Cyber Security: Power and Technology*, 2018, pp. 199–217. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75307-2_12
- [4] P. Cornish szerk., *The Oxford Handbook of Cyber Security*. Oxford University Press, 2021. Online: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198800682.001.0001>
- [5] S. Roy, B. Sridhar, *Cyber- Threat Assessment for the Air Traffic Management System: A Network Controls Approach*. NASA, 2016. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2016-4354>
- [6] *SecRAM 2.0. Security Risk Assessment Methodology for SESAR 2020*. SESAR Joint Undertaking, 2017. Online: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/transversal/SESAR%202020%20-%20Security%20Reference%20Material%20Guidance.pdf>
- [7] *Air Traffic Management – A Cybersecurity Challenge*. Eurocontrol, 2021. Online: <https://www.eurocontrol.int/publication/air-traffic-management-cybersecurity-challenge>
- [8] K. Hemsley, R. Fisher, „A History of Cyber Incidents and Threats Involving Industrial Control Systems,” in *Critical Infrastructure Protection XII. ICCIP 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 542. J. Staggs, S. Shenoj szerk. Cham, Springer, 2018, pp. 215–242. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04537-1_12
- [9] K. Bernsmed, G. Bour, „An Evaluation of Practitioners' Perceptions of a Security Risk Assessment Methodology in Air Traffic Management Projects,” *Journal of Air Transport Management*, 102. évf. 2022. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102223>
- [10] Horváth G., „A helyszíntől független repülőtéri irányítás katonai alkalmazhatóságának vizsgálata a kapcsolódó SESAR-projekt tapasztalatainak tükrében,” *Repüléstudományi Közlemények*, 34. évf. 2. sz. pp. 95–106. 2022. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2022.2.8>
- [11] *Opinion 03/2021. Management of Information Security Risks*. European Aviation Safety Agency, 2021. június 11. Online: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/opinions/opinion-032021>
- [12] K. Charitoudi, A. Blyth, „A Socio-Technical Approach to Cyber Risk Management and Impact Assessment,” *Journal of Information Security*, 4. évf. 1. sz. pp. 33–41. 2013. Online: <https://doi.org/10.4236/jis.2013.41005>
- [13] J. de Haan, „Specific Air Traffic Management Cybersecurity Challenges: Architecture and Supply Chain,” *Proceedings of the IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops*. New York, Association for Computing Machinery, 2020. pp. 245–249. Online: <https://doi.org/10.1145/3387940.3392223>
- [14] A. Gurtuv, E. Sofie, „Demonstrating ADS-B AND CPDLC Attacks with Software-Defined Radio,” in *IEEE 2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. Herndon, 2020. Online: <https://doi.org/10.1109/ICNS50378.2020.9222945>
- [15] R. Santamarta, *A Wake-up Call for SATCOM Security (Technical White Paper)*. IOActive, 2014. Online: https://ioactive.com/wp-content/uploads/2018/05/IOActive_SATCOM_Security_WhitePaper.pdf

- [16] R. Milne, „Russian GPS Jamming Threatens Air Disaster, Warn Baltic Ministers”, *Financial Times*, 2024. április 28. Online: <https://www.ft.com/content/37776b16-0b92-4a23-9f90-199d45d955c3>
- [17] G. Lykou, G. Iakovakis, D. Gritzalis, „Aviation Cybersecurity and Cyber-Resilience: Assessing Risk in Air Traffic Management,” in *Critical Infrastructure Security and Resilience, Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. D. Gritzalis, M. Theocharidou, G. Stergiopoulos szerk. Cham, Springer, 2019, pp. 245–260. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00024-0_13
- [18] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/2555 irányelve (2022. december 14.) az Unió egész területén egységesen magas szintű kiberbiztonságot biztosító intézkedésekről, valamint a 910/2014/EU rendelet és az (EU) 2018/1972 irányelv módosításáról és az (EU) 2016/1148 irányelv hatályon kívül helyezéséről (NIS 2 irányelv) (EGT-vonatkozású szöveg).
- [19] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/881 rendelete (2019. április 17.) az ENISA-ról (az Európai Unió Kiberbiztonsági Ügynökségről) és az információs és kommunikációs technológiák kiberbiztonsági tanúsításáról, valamint az 526/2013/EU rendelet hatályon kívül helyezéséről (kiberbiztonsági jogszabály) (EGT-vonatkozású szöveg)
- [20] *Minimum Set of Security Controls, D05-006, Edition 00.06.00*. SESAR, 2013.
- [21] K. Bernsmed, M. G. Jaatun, P. H. Meland, „Safety Critical Software and Security – How Low Can You Go?,” in *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. London, 2018, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569579>
- [22] *The Global Risks Report 2025, 20th Edition*. Cologne, World Economic Forum, 2025. Online: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2025.pdf
- [23] *The CEO's Guide to Cybersecurity*. Boston Consulting Group, 2021. Online: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Executive-Perspectives-CEO-Guide-to-Cybersecurity.pdf>
- [24] G. Horváth, „The Cybersecurity Aspect of Remote Tower Optical Systems,” *Acta Avionica*, 25. évf. 1. sz. pp. 45–54. 2023. Online: <https://doi.org/10.35116/aa.2023.0006>
- [25] E. Frumento, *The Role of Social Engineering in the Evolution of Attacks*. Figshare, 2020. Online: <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.12369248.V1>
- [26] E. Frumento, C. Dambra, „The HERMENEUT Project: Enterprises Intangible Risk Management via Economic Models based on Simulation of Modern Cyber Attacks,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Information Systems Security and Privacy ICISSP*. Prague, SciTePress, 2019, pp. 495–502. Online: <https://doi.org/10.5220/0007413504950502>
- [27] *aDvanced sOcial enGineering And vulNerability Assesment Framework*. 2018. Online: <https://doi.org/10.3030/653618>
- [28] A. Tursunbayeva, S. Di Lauro, C. Pagliari, „People Analytics – A Scoping Review of Conceptual Boundaries and Value Propositions,” *International Journal of Information Management*, 43. évf. pp. 224–247. 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.08.002>
- [29] T. Elias, *Learning Analytics: Definitions, Processes and Potential*. The Landing-Athabasca University, 2011. Online: <https://landing.athabasca.ca/file/download/43713>
- [30] M. Bourbonniere, „Military Aircraft and International Law: Chicago Opus 3,” *Journal of Air Law and Commerce*, 66. évf. 3. sz. pp. 885–978. 2001. Online: <https://scholar.smu.edu/jalc/vol66/iss3/2>

- [31] J. N. Bradbury, „ICAO and Civil/Military Coordination,” in *Automation and Systems Issues in Air Traffic Control*. J. A. Wise, V. D. Hopkin, M. L. Smith szerk. Berlin, Heidelberg, Springer, 1991, pp. 301–319. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-642-76556-8_30
- [32] B. A. Berman, R. K. Dismukes, K. K. Jobe, *Performance Data Errors in Air Carrier Operations: Causes and Countermeasures*. NASA, 2012. Online: https://human-factors.arc.nasa.gov/publications/NASA_TM2012-216007.pdf

Cybersecurity Risk Assessment in Air Traffic Management: The European Methodology

The digitalisation of Air Traffic Management (ATM) systems, the introduction of service-oriented architectures, and data-sharing models significantly increase system complexity and cybersecurity exposure. This paper comprehensively analyses the cybersecurity challenges of modern ATM systems, with particular focus on the practical limitations of risk assessment methodologies (e.g. SecRAM), vulnerabilities in communication protocols (ADS-B, CPDLC), and the cascade effects caused by supply chains and system integration. The study presents the innovative approach of the Horizon Europe SEC-AIRSPACE project, which aims to enhance existing risk management procedures rather than developing new methodologies. The project's key innovations include the development of a holistic ATM taxonomy, consideration of virtualised environments and human factors, and the implementation of dynamic risk monitoring. The results contribute to establishing a cyber resilient ATM ecosystem capable of maintaining the exceptional safety standards of air transportation even in a continuously evolving threat landscape.

Keywords: cybersecurity, risk assessment, air traffic management, ATM

Horváth Gábor
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Katonai Műszaki Doktori Iskola
horvath.gabor@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-2939-1426

Gábor Horváth
PhD student
Ludovika University of Public Service
Doctoral School of Military Engineering
horvath.gabor@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-2939-1426

Jelen mű a Kulturális és Innovációs Minisztérium Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Albert Csongor, Békési Bertold, Jámbor Krisztián

A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat, az AFDX

Kutatásunk középpontjában az ARINC 664-P7 áll, egy fejlett, determinisztikus adatátviteli hálózati szabvány, amelyet a modern repüléstechnikai rendszerekben használnak, például az Airbus és a Boeing legújabb repülőgépein. Az IEEE¹ 802.3 Ethernet-technológiára épül, kiegészítve speciális protokollkiterjesztésekkel a nagy megbízhatóság és az alacsony késleltetés érdekében. A rendszer három fő eleme a végponti rendszerek (adatküldés és -fogadás), a kapcsolók (adatcsomagok irányítása) és a virtuális kapcsolatok (logikai kapcsolatok a végpontok között). Az ARINC 664-P7 biztosítja az adatátvitel integritását, az ütközésmentességet és a redundanciát, támogatva a valós idejű kommunikációt repüléstechnikai környezetekben.

Kulcsszavak: Ethernet, adatkapcsolat, avionika

1. Bevezetés az Avionikai Full Duplex Ethernet működésébe

A légi járművek üzem közben számos érzékelő adatát használják fel, ezen adatok eljuttatása a megfelelő szabályzást végző döntéshozó szervek vagy a megjelenítő eszközök felé létfontosságú, és ezek mellett szigorú minőségi követelményeknek kell hogy megfeleljen. Ezeket korábban különféle adatbuszok segítségével végezték, azonban napjainkban a gépjárműiparhoz hasonlóan Ethernet-alapú megoldásra cserélik le. Ezt az indokolja, hogy a régebbi járművekhez képest a maiakban jelentősen több érzékelő adatát kell a feldolgozóegységek felé továbbítani, amit a régebbi adatbuszok már kevésbé képesek hatékonyan megvalósítani.

A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat az AFDX, azaz az Avionics Full Duplex kapcsolt Ethernet-hálózat, amelyet az ARINC-664 szabvány ír le. Az ARINC 664-P7 kommunikációs hálózat egy fejlett, determinisztikus adatátviteli rendszer, amely túlmutat a hagyományos adatbusz funkcióin. Számos modern repülőgéptípusban, például az Airbus A380, A350, A400M, a Boeing 787 Dreamliner, a COMAC ARJ21 és a Suhoj Superjet 100 fedélzetén alkalmazzák, és várhatóan az új generációs polgári repülőgépek szabványos kommunikációs hálózatává válik, megbízhatósága miatt. Az ARINC 664-P7 alapját a kereskedelmi célokra

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers – egy nemzetközi szakmai szervezet, amely elektronikai, villamosmérnöki, valamint számítástechnikai tudományokhoz kapcsolódó szabványok kidolgozásával is foglalkozik.

kifejlesztett, végrendszerkapcsolatok kommunikációs technológiája képezi, ezért az olyan fogalmak, mint a végrendszer, gyakran előfordulnak benne [1], [2].

Az ARINC 664-P7, amelyet Aviation Full Duplex Switched Ethernet néven is ismernek, az IEEE 802.3 szabvány szerinti 10/100 Mbps-os Ethernet-technológiára, MAC²-címezésre, IP-protokollokra és UDP-re épül. Ezt azonban speciális protokollkiterjesztések és forgalommenedzsment egészíti ki annak érdekében, hogy a repüléstechnikai alkalmazásokhoz szükséges determinisztikus viselkedést, redundanciát és megbízhatóságot biztosítsa [1], [2].

A hálózat három fő elemből áll:

- végponti rendszer (*End-System*): az a készülék, amely adatokat küld vagy fogad a hálózaton keresztül;
- kapcsoló (*Switch*): forgalomkezelést, szűrést és az adatcsomagok célállomások felé irányítását végzi;
- virtuális kapcsolatok (*Virtual Links*): ezek egyirányú logikai kapcsolatokat biztosítanak a végpontok között, egy vagy több célállomás számára. Ez a működés hasonló az ARINC 429 protokollban alkalmazott technikákhoz.

A forgalmat az ARINC 664-P7 kapcsolók konfigurációs táblázatok alapján irányítják, amelyek garantált sávszélességet, késleltetést, rendelkezésre állást és integritást írnak elő. Ez kulcs szerepet játszik a rendszer fokozatos tanúsítási folyamatában.

Az Ethernet-technológia, amely az 1970-es években jelent meg, nagyon vonzó a repüléstechnikai alkalmazások számára. Bizonyított megbízhatósága, alacsony költsége és nagy sávszélessége jelentős előrelépést kínál a korábbi adatbuszokhoz képest. Az Ethernet csomagkapcsolt hálózat, amely általában csillagtopológiában működik, és az adatokat keretek formájában továbbítja [1], [2], [3], [4].

2. Ethernet-keretformátum

Az Ethernet-keret egy olyan alapvető adatstruktúra, amelyet az Ethernet-alapú hálózatokban az adatok továbbítására használnak. A keret több részből áll, amelyek mindegyike meghatározott funkciót lát el, biztosítva a megbízható kommunikációt a hálózatban található eszközök között. Az 1. ábrán részletesen bemutatjuk a keret felépítését és szerepét [1], [2], [4], [12].

2.1. Előtag (*preamble*)

A keret elején található preamble egy speciális bitmintát tartalmaz, amely értesíti a fogadó terminálokat arról, hogy egy új keret érkezik. Ez lehetővé teszi a hálózati eszközök számára, hogy előkészüljenek az adatfogadásra. Ezenkívül a preamble segíti az időzítés pontos szinkronizálását a küldő és a fogadó között, különösen nagy sebességű adatátvitel esetén [1], [5].

² Media Access Control Address – hálózati eszközök egyedi, fizikai címe.

2.2. A keret kezdete

A keretkezdet-határoló egyedi bitminta, amely egyértelműen jelzi a keret elejét. Ez kulcsfontosságú a fogadó eszközök számára, mert ezzel szinkronizálják a keret vételét, és biztosítják, hogy az adatokat pontosan a megfelelő pozícióból kezdjék olvasni [1], [5].

2.3. Cél- és forráscímek

A forráscím egyedi azonosító, amely meghatározza, melyik terminál küldte a keretet. A cél-cím alapján állapítja meg a hálózat, hogy az adatokat hová kell továbbítani. A célcím lehet:

- egyetlen terminál címe (*Unicast*);
- terminálok egy csoportja (*Multicast*);
- az összes terminálon történő átvitel (*Broadcast*) [1], [6].

2.4. Hosszmező

A hosszmező jelzi a keretben található adatbájtok számát. Egy bájt 8 bitből áll, így ez az érték meghatározza, hogy a keret mekkora adatmennyiséget tartalmaz. Ez fontos a fogadó eszköz számára, hogy pontosan tudja, meddig tart az adat, és hol kezdődik a keret vége [1], [5], [6].

2.5. Adatrész

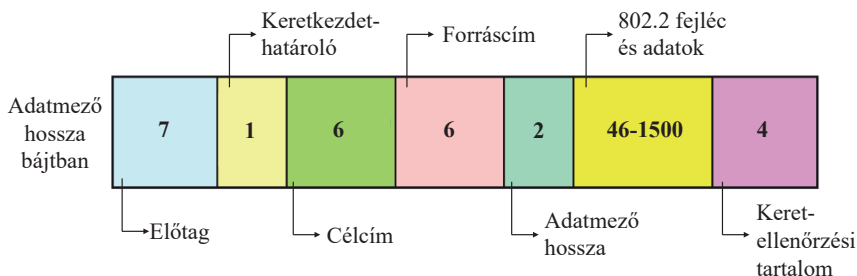
Ez a keret legfontosabb része, amely az átvitelre szánt tényleges adatot tartalmazza. Az adat lehet például egy fájl egy része, egy üzenet vagy egy hálózati protokoll vezérlőinformációja. Az adatrész mérete rugalmas, de a hálózati szabványok előírják a minimális és maximális méreteket [1], [5], [6].

2.6. Keretellenőrzési sorrend³

A keret végén található ciklikus redundancia-ellenőrzési (CRC-⁴) kód a hibák felismerésére szolgál. Ez egy matematikai algoritmus alapján generált ellenőrző sorozat, amelyet a küldő eszköz hoz létre az adat és a címek alapján. A fogadó eszköz újraszámolja a CRC-t, és összehasonlítja a kapott értékkel. Ha az értékek eltérnek, az azt jelzi, hogy hiba történt az átvitel során, és a keretet el kell utasítani vagy újra kell kérni [1], [5], [6], [12].

³ FCS – Frame Check Sequence.

⁴ Cyclic Redundancy Check.



1. ábra
Ethernet keretformátum (a szerzők [1] alapján)

3. Hálózati topológia

Az ARINC 664-P7 avionikai hálózat egy csillagtopológián alapuló rendszer, amely két avionikai részre van osztva. Mindkét rész számos avionikai rendszer számítástechnikai eleméből áll, amelyek mindegyike egy végponti terminált tartalmaz. A végponti terminálok az adott tartományon belül egy tartományi hálózati kapcsolón keresztül kommunikálnak egymással. A tartományok közötti kommunikációt szintén a kapcsolók biztosítják, amelyek adatsomogokat továbbítanak az adó és a vevő között. A kapcsolók szükség esetén képesek az üzeneteket több előfizetőnek is továbbítani [1], [4].

A hálózat fizikai rétege Ethernet Cat5 szabványnak felel meg, amely 10–100 Mbps sebességet biztosít, és a repülési környezet igényeinek megfelelően megerősített alkatrészekből áll. Az Airbus A380 esetében a kapcsoló egy 2-MCU⁵ LRU⁶ cserélhető egység formájában valósul meg, míg a végponti terminál egy alkalmazásspecifikus integrált áramkörre (ASIC⁷) épül, amely egy PCI-⁸ áramköri kártyán helyezkedik el [1], [4].

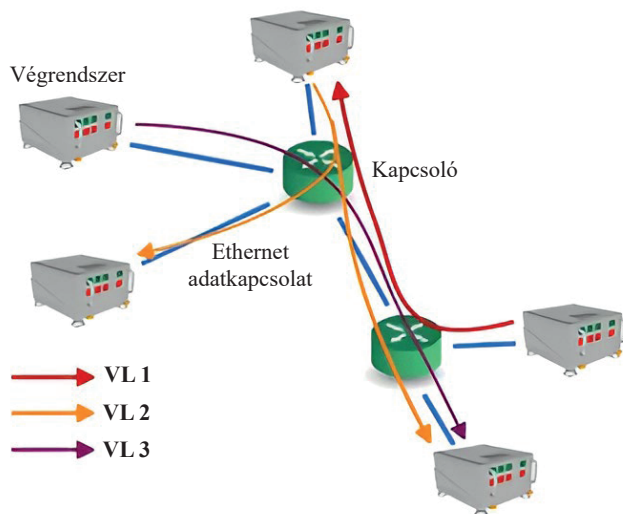
A fejlettebb ARINC 664-P7 hálózatok esetében a kettős csatornás, kettős redundáns kapcsolt csillagtopológia alkalmazására kerül sor. Minden végponti terminálnak két független kommunikációs útvonala van (A és B csatorna). Ezenkívül minden hálózati kapcsoló közvetlen kapcsolatban áll az adott csatorna összes többi kapcsolójával. Ez a redundáns architektúra (2. ábra) lehetővé teszi az adatátvitel és -fogadás párhuzamos megvalósítását, biztosítva, hogy az adatkommunikáció elvesztése rendkívül valószínűtlen legyen [1], [4].

⁵ Modular Concept Unit – modulrendszerű berendezés.

⁶ Line Replaceable Unit – cserélhető egység, forgalmi karbantartás során cserélhető egység.

⁷ Application-Specific Integrated Circuit.

⁸ Peripheral Component Interconnect – processzorfüggetlen adatsín.



2. ábra
ARINC-664 kettős hálózati redundancia (a szerzők [13] alapján)

4. Ütközések elkerülése

Az ARINC 664-P7 protokoll az Ethernet hálózati technológia egy speciális változata, amelyet repüléstechnikai rendszerekhez fejlesztettek ki, hogy megfeleljen a valós idejű, magas megbízhatóságot és alacsony késleltetést igénylő adatkommunikációs követelményeknek. A hagyományos Ethernet-protokollal szemben az ARINC 664-P7 biztosítja az adatsomagok integritását, a késleltetés minimalizálását és az ütközések elkerülését [1], [4], [7].

A rendszer alapja a *virtuális kapcsolat* (VL⁹), amely egy meghatározott adatforrástól egy vagy több célrendszerhez juttat el adatsomagokat. Az Ethernet-keretformátumot úgy módosítják, hogy a forrás- és célcímet egy virtuáliskapcsolat-azonosító (VL ID) helyettesíti. A *Switch* (kapcsoló) egy konfigurációs táblában rögzíti az összes engedélyezett VL ID-t, ellenőrzi az adatsomagok forrását és tartalmát, majd azokat az előre meghatározott célrendszerekhez továbbítja [1], [4], [7].

Az ütközések elkerülése érdekében az ARINC 664-P7 teljes duplex hálózatként működik (3. ábra), ahol az adó (Tx) és vevő (Rx) adatok külön csavart érpáron haladnak. Az Rx- és Tx-pufferek FIFO¹⁰-memóriákat használnak, amelyek az adatsomagokat sorrendben tárolják és továbbítják. Habár ütközések és adatvesztés nem fordulhat elő, késleltetés (*Jitter*) lehetséges. A hálózattervezőknek gondoskodniuk kell arról, hogy az adatforgalom ne okozzon

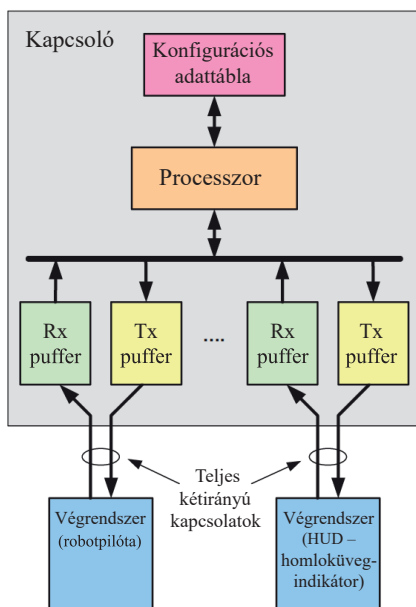
⁹ Virtual Link.

¹⁰ First-in, first-out – Az elsődleges memóriába csak korlátozott mennyiségű lapok férnek bele. Ha egy program olyan lapra hivatkozik, ami nincs benne a memóriában, akkor laphiba történik. A lapozási stratégiák célja, hogy a laphibák száma minimális legyen. A FIFO a lapozási stratégiák egyik fajtája. Az operációs rendszer a lapokat bejöttelük szerinti sorrendben egy listában tárolja. Laphiba esetén a hiányzó lapot a rendszer a lista végére szűri be [10].

túlcsondulást a pufferben, amit a hálózati sávszélesség, késleltetés és *Jitter* szerződéses szabályozásával érnek el [1], [4], [7].

A hálózat adatforgalmát a *sávszélességi allokációs rés* (BAG¹¹) szabályozza, amely meghatározza, hogy egy adott VL milyen időközönként küldhet adatokat. A BAG-értékek jellemzően 1–128 ms között vannak, például egy 16 ms-os BAG 62,5 Hz-es frissítési ciklusnak felel meg. Ha nincs új adat, az adórendszer nem generál VL-üzenetet.

Az ARINC 664-P7 egy kettős redundáns hálózatot alkalmaz, ahol az adatcsomagok két független csatornán (A és B) egyszerre haladnak. A *Switch* CRC-ellenőrzéssel biztosítja az adatintegritását, és a hibás csomagokat elveti. Az adatfogadó rendszer az első érvényes csomagot választja ki, biztosítva ezzel a hálózat rendelkezésre állását és megbízhatóságát [1], [4], [7].

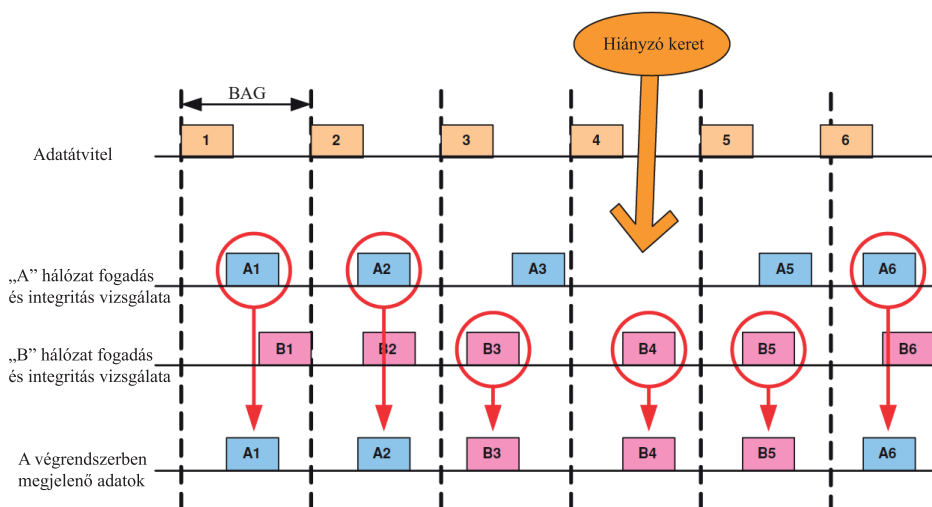


3. ábra
ARINC-664 hálózati kapcsoló (a szerzők [1] alapján)

5. Virtuális kapcsolatok

Az ARINC 664-P7 protokollban a hálózati adatokat *virtuális kapcsolatokkal* osztják fel, amelyek garantált sávszélességet, maximális késleltetést és *Jitter*t biztosítanak. A *switch* a VL-eket bemeneti és kimeneti portok között irányítja, és valós időben kezeli az adatcsomagokat, ellenőrizve, hogy azok mérete és sebessége ne lépje túl a konfigurációban meghatározott értékeket (4. ábra). A prioritásos VL-ek javítják az időkritikus üzenetek teljesítményét [1], [3], [4].

¹¹ Bandwidth Allocation Gap.



4. ábra
Redundanciakezelés a hálózatban (a szerzők [1] alapján)

A *switch* puffereket használ a bemeneti adatforgalom ütközésének elkerülésére és a kimeneti üzenetek rendszerezésére. A *forgalomszabályozás* és a *hibaekülönítés* védi a hálózatot a szerződési feltételeket megsértő eszközöktől (problémák), amelyek adatvesztést okozhatnak [1], [3], [4].

A kettős kapcsolók és redundáns kommunikációs utak biztosítják a magas rendelkezésre állást, míg a CRC-alapú hibadetektálás garantálja az adatintegritást. Noha az ütközések elkerülhetők, az adatok feldolgozása késleltetést okozhat, amelyet a hálózattervezés, a multiplexálás és a *switch* működése befolyásol. A *Jitter*, vagyis az üzenet érkezési időtartamának ingadozása szintén szabályozott, és minden VL megengedett maximális *Jitter* értékét a konfigurációs táblázat rögzíti [1], [3], [4].

6. Protokoll

Az ARINC 664-P7 hálózat lehetővé teszi, hogy a repülélelektronikai alkalmazások UDP¹²- és IP¹³-protokollokon keresztül cseréljenek üzeneteket. Az UDP az olyan karbantartási protokollok alapja is, mint az SNMP¹⁴ és a TFTP¹⁵. Az adatok továbbítása a 2. rétegben, a MAC¹⁶-címei alapján történik, determinisztikus szabályokkal [2], [5], [8].

¹² User Datagram Protocol – felhasználói adatsomag-protokoll.

¹³ Internet Protocol – internetprotokoll.

¹⁴ Simple Network Management Protocol – egyszerű hálózatkezelési protokoll.

¹⁵ Trivial File Transfer Protocol – triviális fájlátviteli szolgáltatás.

¹⁶ A számítógépes hálózatokban a kommunikációs közeghez való hozzáférés szabályozására használt módszerekre és protokollokra utal. Az OSI-modellben az adatkapcsolati réteg alrétege, és felelős az adatsomagok megosztott hálózati közegen keresztüli továbbításáért [11].

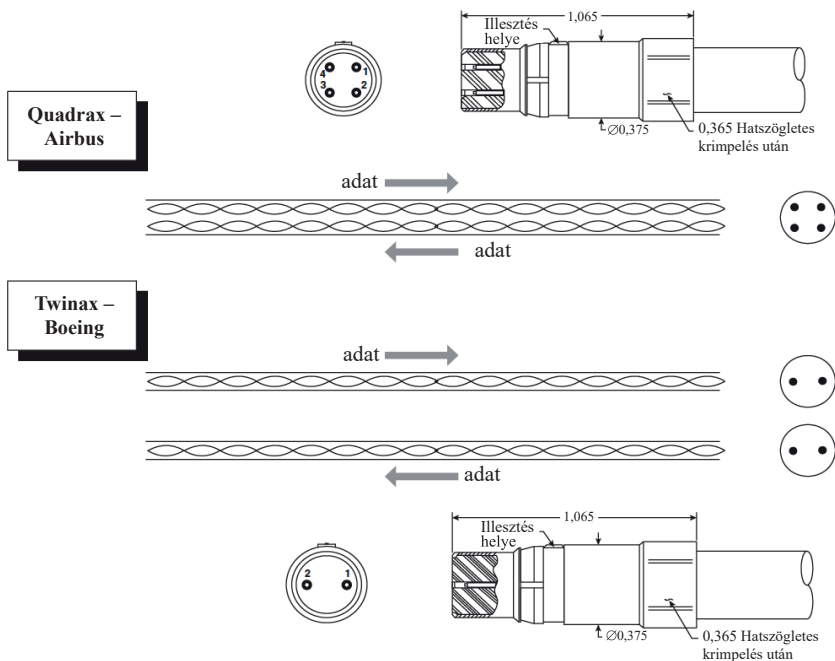
Az alkalmazások kommunikációs csatlakozókon (UDP-portokon) keresztül küldenek és fogadnak adatokat, amelyek kétféle típusba sorolhatók:

- mintavételi csatlakozók: egy kereten belül küldik az adatokat, amelyek felülírhatók vagy elveszhetnek. Főként rendszeresen ismétlődő, de aszinkron folyamatokhoz használják;
- sorba állító csatlakozók: több kereten keresztül küldenek adatokat, amelyek nem vesznek el, és sorrendben maradnak. Eseményvezérelt folyamatokhoz alkalmasak.

Az IP forráscíme mindig *unicast*, míg a célcím lehet *unicast* (egy alkalmazás) vagy *multicast* (több alkalmazás egy végrendszeren belül) [2], [5], [8].

7. Kábelezés

Az Airbus és a Boeing különböző telepítési stratégiákat alkalmaz a kábelezéshez és a csatlakozókhoz, amint az az 5. ábrán látható. Az Airbus a *quadrax* megközelítést alkalmazza (két csavart érpár egy közös külső pajzsban és egyetlen négyutas csatlakozó) 24 AWG¹⁷ vezeték-mérettel. A Boeing a *twinax* megközelítést alkalmazza (két csavart érpárú árnyékolt kábel és két kétutas csatlakozó), 22 AWG vezeték-mérettel. A Boeing megközelítése egyértelműen nehezebb, de fizikailag valószínűleg robusztusabb [1], [8], [9].



5. ábra
Különböző kábelezési formák (a szerzők [1] alapján)

¹⁷ American Wire Gauge – amerikai huzalszámozási szabvány.

8. Összefoglalás

Az ARINC 664-P7 hálózat az Ethernet-technológia repüléstechnikai változata, amelyet nagy megbízhatóságra és alacsony késleltetésre optimalizáltak. A rendszer fő előnyei közé tartozik a determinisztikus forgalommenedzsment, az adatcsomagok ütközésmentes átvitele és a kettős redundanciát biztosító csillagtopológia. A kommunikációt virtuális kapcsolatok szabályozzák, amelyek meghatározzák az adatátvitel sávszélességét, maximális késleltetését és prioritását. Az ARINC 664-P7 alkalmazása jelentős előrelépést jelent a hagyományos adatbuszokhoz képest, köszönhetően az Ethernet-alapú csomagkapcsolt rendszer rugalmasságának, széles körű protokollátogatásának és költséghatékonyságának. A hálózat különösen fontos a kritikus repüléstechnikai rendszerek kommunikációs igényeinek kielégítésében, és várhatóan az új generációs repülőgépek szabványos megoldásává válik [1], [2], [3].

Felhasznált irodalom

- [1] I. Moir, A. Seabridge, M. Jukes, *Civil Avionics Systems*. Wiley, 2013. Online: <https://doi.org/10.1002/9781118536704>
- [2] *ARINC 664*, Avionics Interface Technologies. Online: https://aviftech.com/ait_product_category/arinc-664/
- [3] P. Heise, „Avionics Full Duplex Ethernet and the Time Sensitive Networking Standard,” 2015. Online: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2015/TSN-Schneele-AFDX-0515-v01.pdf>
- [4] AviftechVideos [@AviftechVideos], „ARINC664 Overview,” *YouTube*, 2012. június 27. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=AuSNKUHday0>
- [5] *IEEE Standard for Ethernet*. IEEE Standards Association. Online: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9844436>
- [6] „Ethernet keretek,” *Prog.hu*, 2000. október 30. Online: <https://prog.hu/cikkek/100265/ethernet-keretek>
- [7] W. Guangyun, Y. Bo, Y. Qinghua, „Key Technologies of ARINC664 Bus Testing,” in *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, Qinhuangdao, 2015, pp. 92–97. Online: <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.27>
- [8] *AFDX Training October 2010 Full*. Online: <https://www.scribd.com/document/135645582/AFDX-Training-October-2010-Full>
- [9] C. R. Spitzer szerk., *Avionics. Development and Implementation*. Boca Raton, CRC Press, 2007.
- [10] How FIFO Memory Works in Data Buffering and Synchronization. Online: <https://heqingele.com/blog/fifo-memory-data-buffering-synchronization/>
- [11] *Media Access Control (MAC)*. Online: <https://multitech.com/iot-wiki/media-access-control-mac/>
- [12] *Az IEEE 802.3 szabvány és az ETHERNET*. Online: <https://www.szabilinux.hu/konyv/7fejzet/7fie8023.htm>
- [13] Dheeraj Punia, *AFDX®: A Time-Deterministic application of ARINC 664 part 7*. Online: www.logic-fruit.com/blog/arinc/afdx-a-time-deterministic-application-of-arinc-664-part-7/

AFDX, the Ethernet-based Data Network Used in Aviation

Our research focuses on ARINC 664-P7, an advanced deterministic data transmission network standard used in modern aviation systems, such as the latest aircraft from Airbus and Boeing. It is based on IEEE 802.3 Ethernet technology, enhanced with specialised protocol extensions to ensure high reliability and low latency. The system consists of three main components: end-systems (data transmission and reception), switches (routing of data packets), and virtual links (logical connections between end-systems). ARINC 664-P7 ensures data transmission integrity, collision-free communication, and redundancy, supporting real-time communication in aviation environments.

Keywords: *Ethernet, data connection, avionics*

Albert Csongor BSc-hallgató Nemzeti Közszerológáti Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Állami légiközlekedési szak, katonai repülóműszaki szakirány, avionika modul albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012	Csongor Albert BSc student Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training, State Aviation, Military Aviation Engineering, Avionics module albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012
Békési Bertold, PhD alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszerológáti Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X	Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X
Jámbor Krisztián mérnökstanár Nemzeti Közszerológáti Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék jambor.krisztian@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-6406-0841	Krisztián Jámbor, MSc Teacher of Engineering Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems jambor.krisztian@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-6406-0841

Tartalom

CSATÓ PÉTER: <i>A Single Fuel Concept realitásai a fenntarthatóság tükrében</i>	5
BELLER BALÁZS: <i>A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója II.</i>	19
FÜSTÖS JULIANNA, VAS TÍMEA, KÁROLY KRISZTIÁN: <i>Légi forgalmi irányítók képzésének és kiválasztásának perspektivikus lehetőségei XR-alapokon humánteljesítmény-diagnosztikai támogatással</i>	47
TAMÁS SZAKÁCS: <i>Orbital Mechanics Two-Body Model for Educational Purposes</i>	61
GÁBOR TERPECZ, GYÖRGY SCHUSTER: <i>Application of Drones in Electrical Power Engineering</i>	73
MHD BASHAR AL KAZZAZ, ÁRPÁD VERESS: <i>CFD Analysis of the Combustion Process Evolved in the TKT-1 Academic Jet Engine</i>	87
ZSOLT LUCZ: <i>Courage as a Virtue in the History of Military Pilots</i>	101
LAJOS HALMI: <i>The Emergence of Classical Military Virtues in Air Force Teams and Their Modern Assessment Possibilities</i>	109
MÉSZÁROS ZOLTÁN: <i>Repülés és repülőeszközök az első magyar katonai szakfolyóiratban 1877 és 1907 között</i>	117
HORVÁTH GÁBOR: <i>Kibervédelmi kockázatértékelés a légi forgalmi irányításban: az európai metodika</i>	135
ALBERT CSONGOR, BÉKÉSI BERTOLD, JÁMBOR KRISZTIÁN: <i>A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat, az AFDX</i>	149