



# REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

## Kiemelt közlemények

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

**CSATÓ PÉTER:** A repülőipar új korszaka:  
a grafénban rejlő innováció

**VIKTÓRIA KESZTYŰS:** Possibilities of Air Force  
Cooperation in the Visegrad Countries

36. évf. (2024)  
1. 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. Kavás 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](mailto:RepTudKozl@uni-nke.hu)

### **Kiadó**

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

**Borítókép:** Szilvássy László



## Tartalom

|                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FALTIN ZSOLT, ROHÁCS JÓZSEF, KAVAS LÁSZLÓ: Integrált repülőterek<br>környezetterhelés-menedzselése . . . . .                                                                                                                                | 5   |
| BELLER BALÁZS: A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója I. . . . .                                                                                                                                                         | 19  |
| SCHUSTER GYÖRGY: A biztonságkritikus fejlesztésben alkalmazott módszertanok . . . . .                                                                                                                                                       | 35  |
| HALMI LAJOS: Az emberi tényező szerepének vizsgálata korszerű diagnosztikai<br>és információtechnológiai eszközök alkalmazásával – különös tekintettel<br>az orvosbiológiai monitorozás területére a repülésbiztonság aspektusából. . . . . | 47  |
| CSATÓ PÉTER: A repülőipar új korszaka: a grafénban rejlő innováció . . . . .                                                                                                                                                                | 55  |
| VIKTÓRIA KESZTYŰS: Possibilities of Air Force Cooperation in the Visegrad Countries . . . .                                                                                                                                                 | 71  |
| TERPECH GÁBOR, SCHUSTER GYÖRGY: Személyzet nélküli eVTOL légi járművek<br>biztonsági kihívásai . . . . .                                                                                                                                    | 81  |
| LÁSZLÓ GAJDÁCS: The Potential Flight Safety Risks Associated with Unmanned<br>Aerial Vehicles and the Importance of Ensuring their Visibility . . . . .                                                                                     | 97  |
| MAJOR GÁBOR, ALBERT CSONGOR: A rádiólokáció fejlődéstörténete<br>és napjainkban betöltött szerepe. . . . .                                                                                                                                  | 109 |
| MHD BASHAR AL KAZZAZ, ÁRPÁD VERESS: Towards Greener Skies: Past<br>Achievements and Future Horizons of Sustainable Aviation Fuels. . . . .                                                                                                  | 123 |





Faltin Zsolt, Rohács József, Kavas László

## Integrált repülőterek környezetterhelés-menedzselése

*A UAV- vagy drónfejlesztések és azok alkalmazásának elterjedésével egyre fontosabb feladat integrálásuk a teljes katonai és civil repülésbe. A repüléstudományi kutatóintézetek, kutatók ajánlására a légügyi hatóságok már egy sor szabályt alkottak, és utasítást adtak ki a drónokat is üzemeltető, úgynevezett integrált repülőterek biztonságos, hatékony és környezetterhelést minimalizáló működtetése céljával. A cikk az integrált repülőterek környezetterhelésének menedzselésével foglalkozik. Megvizsgálja az integrált repülőterek sajátosságait, a környezetterhelés becslési eljárásait, a terheléscsökkentés lehetőségeit, a környezetterhelés minimalizálásának a menedzselését. A publikáció újdonságtartalma a környezetterhelés fajlagos, teljes élettartamciklus-számítási eljárás alkalmazása a repülési eljárásokkal összekapcsoltan. Az eredmények hozzájárulnak a környezetterhelést csökkentő menedzsmenteljárások kidolgozásához és alkalmazásához.*

**Kulcsszavak:** UAV, drón, integrált repülőtér, környezetterhelés, fajlagos teljes élettartamciklus környezetterhelés-számítása, repülési eljárások, környezetterhelés menedzselése

### 1. Bevezetés

A jelenlegi háborús események tovább gyorsították az UAV-k/drónok fejlesztését, alkalmazását, mind katonai, mind civil területen. Kezdetben – különösen a katonai gépek esetében – az UAV<sup>1</sup> elnevezést alkalmazták, később megjelentek az RPA<sup>2</sup> vagy RPV<sup>3</sup> betűszavakkal is megadott gépek [9]. Ma ugyanezekre széles körben használják a drón megnevezést, miközben lehet olyan a fedélzeten ember nélküli gép, amely több tonna felszálló tömegű, vagy pilóta nélküli repülőgép, amely utast szállít és azt is drónnak hívják. (A továbbiakban, ebben a cikkben az UAV rövidítést alkalmazzuk.)

A repüléstudományi kutatóintézetek, kutatók ajánlására a légügyi hatóságok már egy sor szabályt alkottak, és utasítás adtak ki [3], [4], [5], [7] a drónokat is üzemeltető, úgynevezett integrált repülőterek biztonságos, hatékony és környezetterhelés-minimalizáló működtetése céljával. Mindezek ellenére a szabályozás még nem teljes, és egy sor további problémát is meg kell oldani. Az egyik ilyen a környezetterhelés.

<sup>1</sup> Unmanned Aerial Vehicles – pilóta nélküli légi járművek.

<sup>2</sup> Remotely Piloted Aircraft – távirányításos (pilóta által vezetett) repülőgépek.

<sup>3</sup> Remotely Piloted Vehicle – távirányításos jármű.

A témakör közvetlen része a Nemzeti Közzolgálati Egyetemen elindított, TKP2021-NVA-16 azonosítószámú, „Alkalmazott katonai műszaki-, had- és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című projekt KKT1/GR Aerodrom munkacsoport tevékenységének.

Ez a cikk a drónokat is üzemeltető, úgynevezett integrált repülőterek környezetterhelésének a menedzselésével foglalkozik.

## 2. Az integrált repülőterek sajátosságai

Az „integrált repülőtér” fogalom többféleképpen értelmezett. A polgári légi közlekedésben az integrált repülőtér egy hálózati pont a multimodális közlekedésben. Az amerikai légügyi hivatal, az FAA<sup>4</sup> az összes kereskedelmi repülőteret, a nagyvárosok körzetében működő nagy kapacitású általános repülőteret és további kiválasztott általános repülőtereket az *Integrált Repülőtér Rendszerek Nemzeti Terve* című dokumentumban foglalta össze [6]. Magyarországon is léteznek úgynevezett kapcsolt vagy kettős hasznosítású repülőterek, amelyeket a katonai és a polgári repülés együtt használ.

Az új szabályozások biztonsági és repülésvédelmi okokból védik a (kisebb méretű) drónok repülésétől a repülőtereket. A védett zóna a repülőtér 5 mérföldes (~8 km) körzetét jelöli. Igaz, megfelelő légi alkalmassági engedélyek birtokában és a repülőtér üzemeltetését támogató (repülőtér-védelmi, mozgás, infrastruktúraállapot stb. ellenőrzést végrehajtó) drónok a kivételek csoportjába tartoznak.

A katonai repülőterek más elbírálás alá esnek (1. ábra). Az NKE hivatkozott kutatási projektje a drónokat és katonai légi eszközöket együttesen üzemeltető repülőtereket integrált repülőtereknek nevezi.

A katonai és a civil repülőterek közt van egy sor lényeges különbség. Közülük nem egy egyszerűen érthető és „szembetűnő”. Például a katonai repülőtér nem rendelkezik utasterminállal, utas- és csomagkezelő eszközökkel, jelentős személygépkocsi-parkolóval, sajátos kiegészítő egységekkel, mint az üzleti repülőgépek tárolására, használatára alkalmas területekkel, esetlegesen az üzleti utazók részére külön utaskezeléssel. Természetesen mindkét repülőtér alkalmas teherszállító gépek fogadására, de a polgári repülőtereken kiépített cargoterület lényegesen nagyobb. További jelentős különbség, hogy a repülőterek fényjelzése különböző. A katonai repülőtereken körbe forgó, percnként 16–20 frekvenciával megjelenő két fehér, egy zöld jelből álló sorozat. A polgári repülőtereken a fényjelzés lehet állandó vagy forgó. A földi repülőtereken fehér–zöld, a vízi repülőtereken fehér–sárga, a heliportokon pedig zöld–sárga–fehér fényjeleket alkalmaznak, valamelyest nagyobb frekvenciával.

<sup>4</sup> Federal Aviation Administration.



1. ábra

*A kínai TV bemutatta, hogyan működnek együtt a többfunkciós J-16-os vadászipülőgépek a GJ-2-es felderítő drónnal [12]*

További fontos különbség, hogy a katonai repülőtereken állami repülőgépeket üzemeltetnek. A polgári és a katonai repülőtereken egyaránt léteznek persze hangárok, karbantartó bázisok, kiszolgálóegységek, a személyzet számára szolgáló irodák, a légi forgalmat ellenőrző és menedzselő eszközök, szolgálatok. A katonai repülőtereken a gépeket gyakran speciális fedezékhangárokból vagy bunkerekben tárolják.

A kettős hasznosítású repülőterek persze mind a polgári, mind a katonai elvárásoknak megfelelnek.

Az integrált repülőterek természetesen különböznek a hagyományos értelemben vett katonai és polgári repülőterektől.

A projekt munkacsoportja a következők szerint értékelte a legfontosabb sajátosságokat.

- Elvileg a drónok alkalmazása könnyen beilleszthető a repülőtér működésébe, hiszen „csak” a repülőtéri mozgásokat és a közelkörzeti légtérellenőrzést kell megfelelő érzékenységre kialakítani.
- Általános felfogás szerint a legfontosabb a légtérhasználat és a légi forgalom menedzselése, miközben legalább ilyen fontos a konfliktuskezelés a konfliktusok detektálása és elkerülése [8].
- Az integrált repülőtereken a drónok használatának négy formáját lehet megkülönböztetni:
  - a drónok és a hagyományos katonai repülőgépek közvetlen együttműködése (lásd 1. ábra);
  - közvetett együttműködés, harcászati, taktikai feladatok ellátása a drónok és a hagyományos repülőgépek között, egymás támogatásával;
  - független tevékenység;
  - koalíciós kötelezettségből adódó (prioritást „élvező”) tevékenység.
- A drónok használatát mindig önálló vezetés látja el, a használati formától függően integrálva a teljes repülőtéri egység irányításába.

- Általánosan elfogadott szemlélet, hogy a drónok működtetése (mind a földi mozgásban, mind a levegőben) lehetőleg térben és időben különállóan valósuljon meg.
- Az előző sajátosság betartását segíti, ha a drónok üzemeltetésére elkülönített infrastruktúrát alakítanak ki.

Az integrált repülőterek biztonságos, hatékony és környezetkímélő működtetése egy sor fontos feladatot jelöl ki. Közülük az egyik a környezetterhelés és annak menedzselése.

Elvileg a kisebb méretű felderítő és taktikai drónok környezetterhelése a hagyományos katonai repülőgépekhez (vadászipülőgépekhez, teher- és csapatszállító, bombázó gépekhez, helikopterekhez) képest eléggé kevés. A probléma viszont az, hogy a drónok alkalmazása miatt megváltoznak az előírt repülési útvonalak, és a drónok repülésének tér- és időbeli elkülönítési igénye miatt a nagyobb katonai repülőgépek napi repüléseinek az ütemezése is megváltozik.

### 3. A környezetterhelés becslése

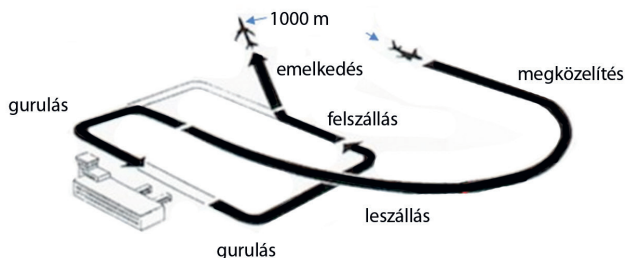
Környezetterhelésnek nevezik a természetes, élő, épített környezet állapotát akár rövid vagy hosszabb távon negatívan befolyásoló anyag, energia kibocsátását. A terhelést különböző formákban határozzák meg, figyelembe véve mitől függ, illetve mire alkalmas az adott mutató:

- a kibocsátás, azaz az emisszió értéke
  - alapvetően a kibocsátó műszaki, technológiai fejlettségétől függ;
  - többnyire mennyiség per idő (pontoszerű emisszióforrás);
  - mennyiség per vonal (vonali kibocsátás), amely már a használati jellemzőktől, itt a repülési pályától, a repülési eljárásoktól függ;
- a kibocsátás szétterjedése, transzmissziója:
  - függ az alkalmazott repülési eljárásoktól;
  - a kibocsátott anyag rekombinációjától, kiülepedésétől;
  - a levegő minőségétől, a légköri meteorológiai (légnyomás, hőmérséklet, páratartalom) adatoktól;
  - a levegő mozgásától (szél, légköri turbulencia);
- a kibocsátott anyag koncentrációja, immisziója:
  - adott területen a környezetterhelés értékelésére alkalmas;
  - területi mutató, indikátor;
- a hatást értékelő indikátorral:
  - adott ágazat egyfajta hatását értékelő mutató;
  - adott káros hatást összesítő mutató;
- az összehatást értékelő indexszel (indikátorok kombinációjával):
  - amely összesíti a közvetlen és közvetett;
  - a rövid és hosszú távú;
  - és mindenre kiterjedő hatást.

A terhelési formáktól függően többféle számítási, becslési, szimulációs és általános értékelési eljárást alkalmaznak a környezetterhelés értékelésére.

Az emisszió alapvetően a kibocsátó saját tulajdonsága, amely függ a működési üzem módtól és a használati viszonyoktól. Az emisszió mértékét többnyire előírások szabályozzák

és a kibocsátó műszaki tanúsítványában rögzített értékeket képvisel. A 2. ábra megmutatja a polgári repülésben (az ICAO által) előírt úgynevezett le- és felszállási eljárást (TLC<sup>5</sup>), amely alapján a repülőterek környezetében számítani lehet a repülőgépek által kibocsátott káros anyagokat az adott gépek hajtóműveire meghatározott részterhelésektől függő emissziós értékei alapján.

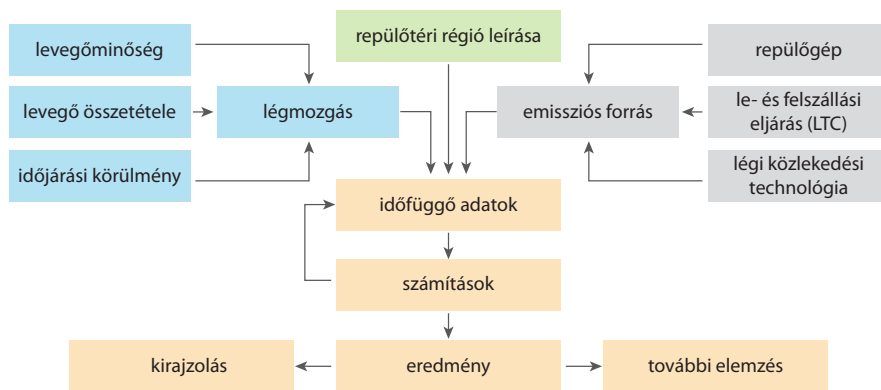


| A repülőgép üzemmódja             | A hajtómű tolóerőszintje | Működési idő (perc) |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------|
| 1. gurulás (közlekedés a talajon) | 7%                       | 26                  |
| 2. felszállás                     | 100%                     | 0,7                 |
| 3. emelkedés                      | 85%                      | 2,2                 |
| 4. megközelítés és leszállás      | 30%                      | 4                   |

2. ábra

Az ICAO<sup>6</sup> által meghatározott le- és felszállási ciklus [10]

A transzmissziós számításra olyan szimulációs eljárás alkalmas, amely figyelembe veszi a transzmissziót befolyásoló összes hatást (3. ábra). A megoldás a vizsgált légtér, itt a repülőter környezetét felölölő és 1000 m magas légtér felosztása kisebb egységekre az egységek közötti transzmisszió, az egységen belüli kibocsátás és rekombináció figyelembevételével. A modell ilyen formán Markov-modellt alkot [10].



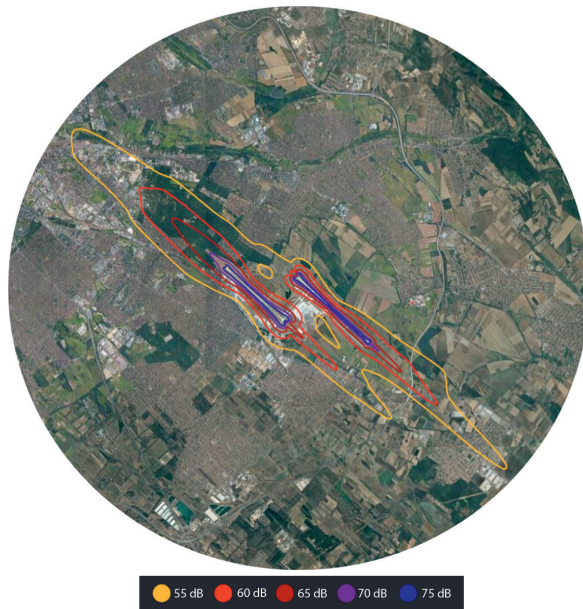
3. ábra

A repülőtér környezetében kibocsátott káros anyag transzmissziójának szimulációs modellje [13]

<sup>5</sup> Takeoff and Landing Calculations.

<sup>6</sup> ICAO – International Civil Aviation Organization (Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet).

A transzmissziós modell végeredményben immissziós értékeket ad ki. Talán a legjobban ismertek a zajtérképek, amelyek a zajemisszió területi immisszióját adják meg (4. ábra).

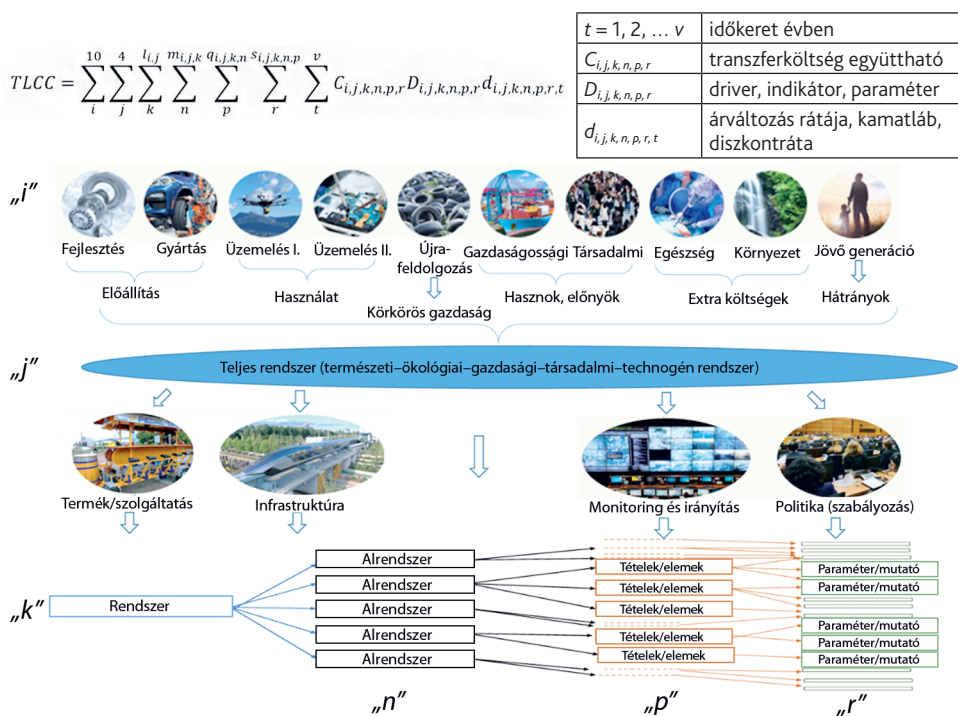


4. ábra

*A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér forgalma által generált zajterhelés (2021, nappal) [2]*

Indikátornak nevezik az állapotot jellemző mutatót. Általánosan fogalmazva elvárás, hogy a környezetterhelést értékelő indikátorok a) jellemezzék a vizsgált dolog, esemény, helyszín (itt repülőtér) fenntarthatóságát a többi hasonló dologhoz, eseményhez, helyhez képest; b) adják meg a dolog, esemény, hely esetleges gyengeségét/gyengeségeit és esélyeit a fejlesztésre és c) mérjék az előrehaladást a kitűzött célok elérésében. Ezt a felfogást alkalmazva a környezetterhelést jellemző indikátorok nagyon széles körből származhatnak az energiafelhasználástól a levegő minőségén át a repülőtéri tevékenység során kibocsátott melegházhathatást keltő gázokig.

Az indexek az adott dolog, esemény, helyszín által keltett (környezetterhelési) hatásokat a kapcsolódó teljes folyamat alapján határozzák meg. A legismertebb formája a teljes élettartamciklusra vonatkozó értékelés. Legtöbbször a fajlagos teljes élettartamköltséget alkalmazzák [11]. A fajlagos azt jelenti, hogy valamilyen egységre vonatkoztatva adják meg az értéket, a repülőgépek esetében ez egy repült óra, de lehet (vagy 100 km) megtett útra, egységnyi teljesítményre (pl. utaskm-re, tonnakm-re) vagy naptári időre, mint egy napra, egy órára. A teljes élettartam a kutatás-fejlesztéstől, a gyártmányfejlesztésen, gyártáson, használaton stb. keresztül az újrahasznosításig minden költséget felölel, ideértve a környezetterhelést és a gazdaságra, társadalomra gyakorolt hatásokon keresztül a jövő nemzedékének az érdekeit is figyelembe vevő költségekig mindent (5. ábra). Ugyanezt meg lehet fogalmazni költség helyett például a környezetterhelést mint a melegházhathatást kiváltó gázok kibocsátása indexeként.



5. ábra

A fajlagos teljes élettartamciklusra\* meghatározott költség számítási elve  
(Megjegyzés: \*Total Life Cycle Cost) [14]

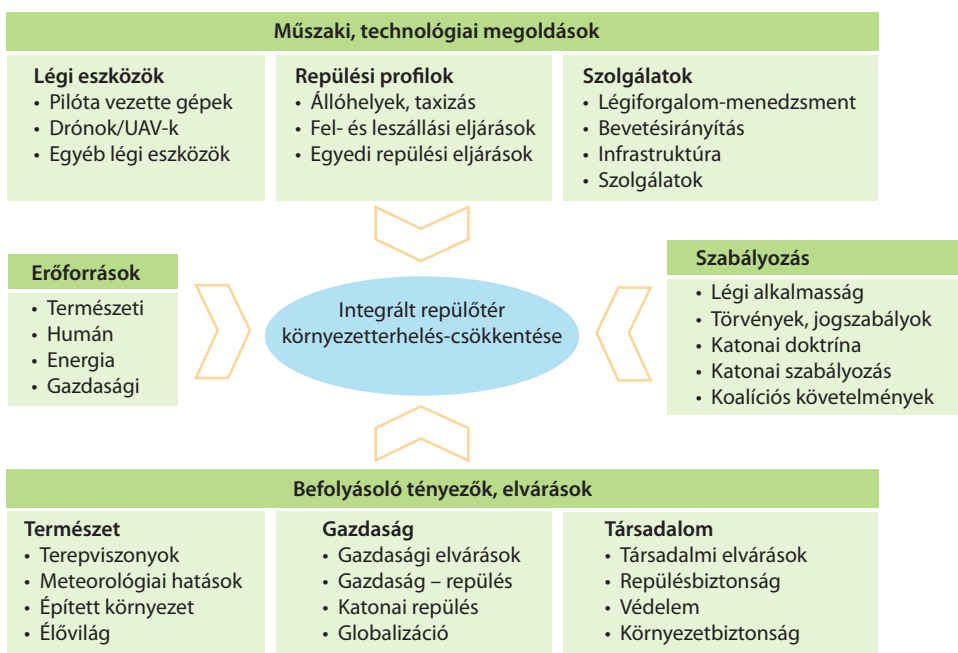
## 4. A környezetterhelés minimalizálására alkalmas eljárások

A cikk célja nem az integrált repülőterek teljes működésének a menedzselése, hanem „csak” a környezetterhelés kezelése.

A 6. ábra összefoglalja mindazokat a tényezőket, sajátosságokat, amelyek közvetlenül vagy közvetve befolyásolják az integrált repülőterek okozta környezetterhelést. Érthető, hogy a használt légi eszközök fejlettsége, műszaki állapota, az alkalmazott repülési eljárás, mint a felszállás, kirepülés közvetlenül meghatározza a kibocsátott káros anyagok mennyiségét és azok megjelenését a repülési pálya mentén. Belátható, hogy akár forgalmi viszonyok miatt, akár más, a légi forgalom menedzselését nehezítő körülmény miatt a leszállás előtt várakozó légi eszközök extra környezetterhelést okoznak. Az is egyértelmű, hogy az erőforrások, mint a természeti erőforrások, például a lítium vagy a kompozit anyagok, alkalmazásához szükséges anyagok elérése, a kerozin minősége, de a személyzet szaktudása, képessége is befolyásolják a környezetterhelést. A gazdasági lehetőségek is azt jelentik, hogy mennyire lehet finanszírozni a környezetkímélő eszközök beszerzését, a repülőtéren és környékén alkalmazható környezetvédelmi megoldásokat. Természetesen a jogszabályok határozzák meg a légi eszközök elvárt tulajdonságait, a repülőtér létesítési követelményeit, ami érinti a környezetvédelmet.



Az egyéb befolyásoló tényezők értelmezése első ránézésre kissé nehezebbnek tűnik. Például a meteorológiai viszonyok (szél vagy a levegő nedvességtartalma) vagy az épített környezet (nemcsak a repülőtér, de a repülőtérhez közeli településeken is) mind befolyásolja a repülési tervek készítését, a repülési eljárások tervezését, a környezetterhelést csökkentő repülési pályák kiválasztását. A csúcstechnológiai megoldásokat, eljárásokat alkalmazó repülés katalizálja a gazdaságot. Ez a katonai repülésre fokozottan igaz. Persze akadnak teljesen sajátos esetek is. Például az építések során a helyszíni szerelések helyett a nagyobb szerkezeti egységek távolabbi összeszerelése, majd azok helikopterekkel való helyükre illesztése kisebb zajjal jár, mint az építési zajterhelés (6. ábra).

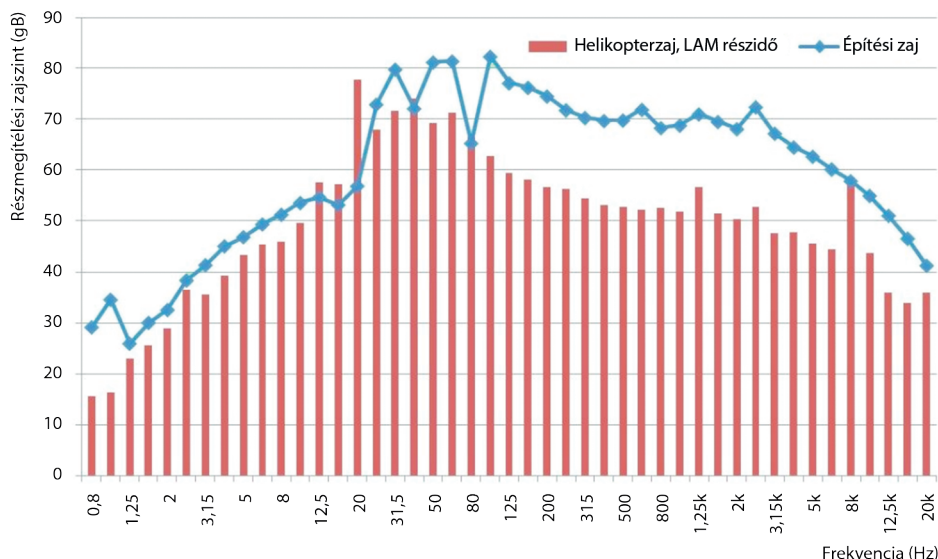


6. ábra

*Az integrált repülőtér környezetterhelés-csökkentési lehetőségei [Kavas László]*

A társadalmi elvárások – a környezetterhelés szempontjából – egyfelől nagyon egyszerűen meghatározhatók: minél kisebb környezetterhelés elérése. Másfelől a társadalom szeretné megvédeni magát, amihez biztonságos, hatékony és környezetterhelést minimalizáló megoldásokat kell alkalmazni.





7. ábra

*A repülésnek akár zajcsökkentő hatása is lehet: a helikopterrel végzett munkák során a zajszint kisebb, mint az építőipari gépek okozta zajterhelés [1]*

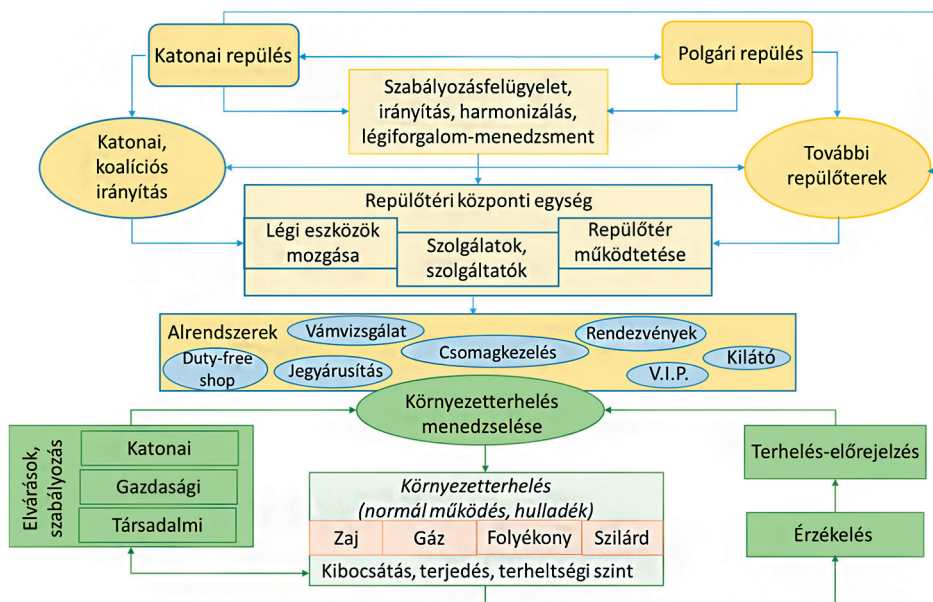
A 6. ábrán összefoglalt lehetőségek minden pontjához több tucat valóságos és jól alkalmazható megoldás tartozik. Ezekről a mélyebb irodalomkutatás, a szabadalmi leírások, a megoldásokat és szolgáltatásokat biztosító vállalkozások ajánlatai alapján lehet tájékozódni.

## 5. A környezetterhelés menedzselésére javasolt eljárás

Az integrált repülőterek olyan katonai, vagy katonai – polgári kettős hasznosítású repülőterek, amelyek integráltan működtetnek UAV-eket vagy drónokat. Az ilyen repülőterek menedzselését, az összes légi eszköz földi és légi mozgását, a repülőtér teljes infrastruktúráját, a repülőtéren folyó összes tevékenységét egy központi egységből kell megoldani. Az egységnek békeidőszakban a repülőterek általános működtetési elveit kell követni, míg a hadgyakorlatok, valamint a háborús körülmények közt tisztán katonai eljárások szerint kell működnie.

Az integrált repülőterek általános működésekor a légi eszközök földi és légi mozgásának, forgalmának a menedzselését célszerűen különválasztják a repülőtér többi tevékenységének (infrastruktúra működtetése, légi eszközök karbantartása, javítása, szolgálatok, személyzet) irányításától, illetve a repülőtéren működő szolgálatok, szolgáltatások irányításától. Továbbá a légi eszközök mozgásának menedzselésekor – a jelenlegi elvárások szerint – célszerű a drónok/UAV-k menedzselését külön egységként megoldani.

A vázoltakhoz képest a környezetterhelés menedzselése horizontálisan beletartozik a szervezeti és működési elvek alapján szétválasztott irányítási, menedzselési (al)központok tevékenységébe (8. ábra). Az alközpontokat például az üzemanyag-ellátás, a karbantartás, javítás, az infrastruktúra üzemeltetése, de akár a kettős hasznosítású repülőtereken az utasok és a csomagok kezelése, a biztonsági ellenőrzések stb. alkotják. A környezetterhelés menedzselése lényegében az összes ilyen alközpont tevékenységének a részét képezi.



8. ábra

A javasolt környezetterhelés-menedzsment rendszer funkcionális ábrája [Kavas László]

A környezetterhelés menedzselését az elvárások, a szabályozási követelmények és a repülőtér működési viszonyainak a függvényében lehet megtervezni. A terhelés megjelenhet zaj, gáz, folyadék és szilárd károsanyag-, hulladékkibocsátás formájában. A környezetterhelés aktív, a valós körülmények mérése alapján megvalósuló menedzseléséhez a repülőtér feladatainak, működési körülményeinek és – a korábban röviden vázolt – emisszió–transzmisszió–immisszió szimulációs elemzése a terhelés előrejelzése alapján valósítható meg.

## 6. Eredmények, következtetések

Az integrált repülőterek működési környezetének kialakítása még nem öltött végleges formát, mivel komoly műszaki és technológiai feladatokat kell megoldani létrehozásukhoz. A polgári légi közlekedés lebonyolítása a mai napig rádióforgalmazás útján történik, ahol az elsődleges és másodlagos radarok segítségével mindössze a légi forgalom ellenőrzését, a légi eszközök

nyomon követését végzik. Az UAV-eszközök esetében feladatkörtől függően többféle irányítási módozat is használatban van a teljesen kézi irányítástól kezdve a teljesen autonóm feladat-végrehajtásig. Például a 10-15 t MTOW feletti drónok esetében is a földi mozgatás, illetve a fegyverrendszerek használata teljesen kézi vezérléssel, emberi döntés útján történik, míg a jól automatizálható, ciklikus feladatok, mint alapvetően az útvonalrepülés, vagy például a fel- és leszállás, a légi utántöltés vagy éppen a kötelékrepülés már teljes egészében számítógépes algoritmusok „döntései” alapján valósulnak meg. És már ezen a területen is az ajtón kopogtat a mesterséges intelligencia, amely mára olyan szintet ért el, hogy egy kísérleti légi eszköz több percet repült a gépi tanulás útján létrehozott algoritmusok alapján. A repülőgép-hordozókon alkalmazott leszállást segítő rendszerekben már olyan szabályozási sebességet és robusztus működést tudtak létrehozni, amely nagy pontossággal és biztonságosan képes a légi eszközök leszállását irányítani egészen a fedélzetig. Korábban ezek az eszközök a pilóta vezette repülőgépek kiegészítő berendezései voltak, amelyeket rossz időjárási körülmények vagy egyéb vészhelyzeti körülmények esetén alkalmaztak. Így már jelen voltak a szolgálatban álló eszközökön, és adaptálásukkal az UAV-k fedélzetére az ember vezette és a pilóta nélküli légi eszközök közös műveletek végrehajtására voltak képesek. A polgári légi közlekedésben szintén léteznek olyan leszállító rendszerek, amelyek képesek rossz időjárási körülmények között az utasszállító gépek leszállását a földet érésig irányítani, de drónokon ezek még nincsenek alkalmazásban. Új rendszer lévén kialakításánál a technológiai problémákat úgy kell megoldani, hogy azok a környezetvédelmi szempontoknak és előírásoknak is maximálisan megfeleljenek.

A fent megfogalmazott követelményrendszerben egy olyan átfogó struktúrát mutattunk be, amely a polgári légi közlekedés és a katonai műveletek lebonyolításának valamennyi aspektusát figyelembe veszi, és azokat rendszerbe foglalva különböző modellekkel közelíti az eltérő nemű, a légi közlekedés lebonyolításának köszönhetően megjelenő káros anyagokat, azok terjedése és disszipációja szempontjából. Az új, átfogó struktúrával az egyes szegmensek közötti kapcsolatok is jól megvilágíthatók, így az azok egymásra hatásából származó előnyök, illetve hátrányok is mérhetővé és kielemezhetővé tehetők.

## Felhasznált irodalom

- [1] Bera J., *Légi közlekedés környezetbiztonsági kapcsolatrendszerének modellezése a helikopterzajtükrében*. PhD-disszertáció, Óbudai Egyetem 2015. Online: [https://oda.uni-obuda.hu/bitstream/handle/20.500.14044/10100/Bera\\_Jozsef\\_PhD.pdf?sequence=1](https://oda.uni-obuda.hu/bitstream/handle/20.500.14044/10100/Bera_Jozsef_PhD.pdf?sequence=1)
- [2] Budapest Airport, *Noise map Budapest*. [é. n.]. Online: [www.bud.hu/en/budapest\\_airport/responsibility/environmental\\_responsibility/noise\\_protection/noise\\_map](http://www.bud.hu/en/budapest_airport/responsibility/environmental_responsibility/noise_protection/noise_map)
- [3] M. W. Burkle, T. E. Montgomery, „The Integrated Airport – A NextGen Test Bed,” in *2008 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, pp. 1–7. 2008. Online: <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2008.4559154>
- [4] C.-A. Ciolponea, „The Integration of Unmanned Aircraft System (UAS) in Current Combat Operations,” *Land Forces Academy Review*, 27. évf. 4. sz. pp. 333–347. 2022. Online: <https://doi.org/10.2478/raft-2022-0042>
- [5] Eurocontrol, *U-space ConOps CORUS-XUAM project D4.1*. 2022. Online: [https://corus-project.eu/wp-content/uploads/2022/11/CORUS-XUAM-D4.1-delivered\\_3.10.pdf](https://corus-project.eu/wp-content/uploads/2022/11/CORUS-XUAM-D4.1-delivered_3.10.pdf)

- [6] Federal Aviation Administration, *National Plan of Integrated Airport Systems (NPIAS) 2009–2013*. Report to Congress. 2008. Online: [www.faa.gov/sites/faa.gov/files/airports/planning\\_capacity/npias/current/npias\\_2009\\_narrative.pdf](http://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/airports/planning_capacity/npias/current/npias_2009_narrative.pdf)
- [7] Federal Aviation Administration, *Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems (UAS) in the National Airspace System (NAS) Roadmap*. Third Edition, 2020.
- [8] K. Neubauer, D. Fleet, F. Grosoli, H. Verstynen, *Unmanned Aircraft Systems (UAS) at Airports: A Primer*. (1–ACRP Report 144), ACPR – Airport Cooperation Research Program, TRB – Transport Research Board, 2015. Online: <https://doi.org/10.17226/21907>
- [9] Palik M., Rohács J. „UAV, UAS, RPA, drón, robotrepülőgép – új technológiák alkalmazása 1.,” és 2. rész. *Haditechnika*, 56. évf. 6. sz. pp. 21–26. 2022. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.04>
- [10] J. Rohacs, „Emission Scattering Simulation for Airport Region,” in *ICAS 2002 Congress Proceedings*, CD-ROM, 7112.1–7112.6. pp. 1–6. 2002. Online: [www.icas.org/icas\\_archive/ICAS2002/PAPERS/7112.PDF](http://www.icas.org/icas_archive/ICAS2002/PAPERS/7112.PDF)
- [11] J. Rohács, D. Rohács, „Total Impact Evaluation of Transportation Systems,” *Transport*, 35. évf. 2. sz. pp. 193–202. 2020. Online: <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12640>
- [12] P. Satam, „1 Drone, 2 Fighters: China's J-16 Jets, Wing Loong-2 UAV Conduct Joint Strike Mission In First-Of-Its-Kind Military Drills,” *Eurasian Times*, 2023. augusztus 13. Online: [www.eurasiantimes.com/1-drone-2-fighters-chinas-j-16-jets-wing-loong-2-uav-conduct-joint-strike-mission-in-first-of-its-kind-military-drills/](http://www.eurasiantimes.com/1-drone-2-fighters-chinas-j-16-jets-wing-loong-2-uav-conduct-joint-strike-mission-in-first-of-its-kind-military-drills/)
- [13] R. Gurály, M. Hideg, J. Rácz, *Aeronautics Related RTD Activities in Hungary*. 2006. Online: [www.airtn.eu/wp-content/uploads/2016/01/f53.pdf](http://www.airtn.eu/wp-content/uploads/2016/01/f53.pdf)
- [14] D. Rohacs, „Technology and Solution-Driven Trends in Sustainable Aviation,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95. évf. 3. sz. pp. 416–430. 2023. Online: <https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2022-0185>

---

## ***Environmental Impact Management of Integrated Airports***

*As the applications of UAV/drone developments accelerate, their integration into the entire military and civil aviation is an increasingly important task. At the recommendation of aeronautical research institutes and researchers, the aviation authorities have already created a series of rules and issued instructions to the so-called drone operators with the aim of operating integrated airports safely, efficiently and minimising environmental impact. The presentation deals with the management of the environmental impact of integrated airports. It examines the characteristics of integrated airports, the estimation procedures of the environmental load, the possibilities of reducing the load, the management of the minimisation of the environmental load. The new content of the presentation is the application of the specific, full life cycle calculation procedure of the environmental load in connection with the flight procedures. The results contribute to the development and application of management procedures that reduce environmental impact.*

**Keywords:** UAV, drone, integrated airport, environmental impact, specific full life cycle environmental impact calculation, flight procedures, environmental impact management

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Faltin Zsolt, MSc<br/>doktori hallgató<br/>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi<br/>Egyetem<br/>Repüléstudományi és Hajózási Tanszék</p> <p><a href="mailto:zsfaltin@vrht.bme.hu">zsfaltin@vrht.bme.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-8361-1397">orcid.org/0000-0002-8361-1397</a></p>                  | <p>Zsolt Faltin, MSc<br/>PhD student<br/>Budapest University of Technology and<br/>Economics<br/>Department of Aeronautics and Naval<br/>Architecture</p> <p><a href="mailto:zsfaltin@vrht.bme.hu">zsfaltin@vrht.bme.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-8361-1397">orcid.org/0000-0002-8361-1397</a></p>                                       |
| <p>Dr. Rohács József, CsC<br/>egyetemi tanár<br/>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi<br/>Egyetem<br/>Repüléstudományi és Hajózási Tanszék</p> <p><a href="mailto:rohacs.jozsef@kjk.bme.hu">rohacs.jozsef@kjk.bme.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-4607-9063">orcid.org/0000-0002-4607-9063</a></p>       | <p>József Rohács, CsC<br/>Professor<br/>Budapest University of Technology and<br/>Economics<br/>Department of Aeronautics Naval<br/>Architecture</p> <p><a href="mailto:rohacs.jozsef@kjk.bme.hu">rohacs.jozsef@kjk.bme.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-4607-9063">orcid.org/0000-0002-4607-9063</a></p>                                    |
| <p>Dr. Kavás László<br/>egyetemi docens<br/>Nemzeti Köszolgálati Egyetem<br/>Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar<br/>Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék</p> <p><a href="mailto:kavas.laszlo@uni-nke.hu">kavas.laszlo@uni-nke.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-7375-3527">orcid.org/0000-0002-7375-3527</a></p> | <p>László Kavás, PhD<br/>Associate Professor<br/>Ludovika University of Public Service<br/>Faculty of Military Science and Officer<br/>Training<br/>Department of Aircraft and Engine</p> <p><a href="mailto:kavas.laszlo@uni-nke.hu">kavas.laszlo@uni-nke.hu</a><br/><a href="https://orcid.org/0000-0002-7375-3527">orcid.org/0000-0002-7375-3527</a></p> |



Beller Balázs

## A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója I.

*Mint sok veszélyes üzem, a légi közlekedés is csak elfogadott és elfogadhatatlan, azaz kezelendő kockázatok mentén valósítható meg. A cikksorozat megírásának célja, hogy bemutassa és sorra vegye az 1960-as évektől megjelenő kockázatelemzési eljárásokat, azok esetleges egymásra épülését, használhatóságát. A cikksorozat első része alapvetően a kezdeti lépésekkel, illetve a lineáris kockázatelemzési eljárásokkal foglalkozik. Ismerteti azon kockázatelemzési és szemléltetési eljárásokat, amelyek nem feltétlenül a légi közlekedésben keletkeztek, de azokat a repülésbiztonság területére átemelve és alkalmazva hozzájárulnak a légi közlekedés biztonságának növeléséhez. A választott kutatási módszer alapvetően a hazai és a külföldi szakirodalom feldolgozásán alapult.*

**Kulcsszavak:** repülésbiztonság, kockázatelemzés, kockázatok kezelése, hibafa, eseményfa, Ishikawa-diagram, lineáris kudarc esemény/hiba esemény modell

### 1. Bevezetés

A légi közlekedés mint tevékenység biztonságos végzése, fenntartása érdekében a repülésbiztonsági szakemberek kezében az egyik legfontosabb eszköz a kockázatok azonosítása, feltárása, megfelelő preventív vagy kockázatcsökkentő eljárás, intézkedés kiválasztása és bevezetése. Az alkalmazott eljárások jelentős részét nem a légi közlekedés területén dolgozták ki, hanem más, olyan nagy kockázatokat rejtő iparágakban, termelési folyamatokban, amelyek magas fokú kockázatot, jelentős mennyiségű veszélyforrást hordozhatnak magukban. A repülés is veszélyes üzem, így a kockázatok csökkentésére irányuló, már bevált jógyakorlatok átvehetők a veszélyeknek hasonlóan kitett területekről.

### 2. A repülésbiztonság

A repülésbiztonság a repülés biztonságos végrehajtása érdekében létrehozott rendszer, amely alapvetően a korábbi légi közlekedési események tapasztalatai alapján, a hasonló körülmények között bekövetkező események valószínűségének vagy a bekövetkezett események negatív hatásainak csökkentésére fókuszál.

Maga a biztonság fogalom „valamely tevékenység, vagy folyamat ártalmas, káros következményeinek elfogadhatatlan kockázatától való mentességeként” [5, p. 1] fogható meg.



Rohács–Horváth elgondolása alapján: „Repülésbiztonságnak nevezik a levegőben történő mozgás során, a komplex emberi és műszaki tevékenység eredményeként létrejött, az adott körülmények között optimális működőképességet, illetve e működőképesség megtartásának valószínűségét.” [16, p. 43]

A két meghatározás alapján látható, hogy a repülés mint tevékenység elfogadható és elfogadhatatlan, azaz kezelendő kockázatok közötti mezsgyén végezhető. Emellett leszögezhető, hogy a légi közlekedésben tökéletes biztonság, illetve kockázatcsökkentés nem létezik, csak a káros következmény bekövetkezési valószínűsége csökkenthető olyan mértékig, amely már elfogadható a döntéshozók számára. Egyértelmű tehát, hogy a repülést mint tevékenységet mindig valamely elfogadott kockázat mellett hajtják végre, amely igaz az állami célú légi közlekedésre is, így különösen a katonai repülésre.

A katonai repülésbiztonság célja, hogy növelje a légierő eszközeinek műveleti hatékonyságát azzal, hogy a légi közlekedési eseményeket kiváltó veszélyforrások biztonsági kockázatát a praktikus megvalósítható mértékig minimálisra<sup>1</sup> csökkenti, valamint törekszik arra, hogy minimalizálja a légi közlekedési események következményeinek súlyosságát. E tevékenység megfelelően hatékony felhasználása esetén a repülésbiztonság a légi műveletek során egy úgynevezett erő többszörözővé válik, mivel igyekszik minimalizálni az erőforrások elvesztését azzal, hogy azonosítja a potenciális kockázatokat és javaslatot tesz azok csökkentésére, megoldására, mielőtt az esetlegesen bekövetkező légi közlekedési események negatívan befolyásolnák a műveletek végrehajtásának hatékonyságát [13, pp. 1–2].

### 3. Kockázatok kezelése

A kockázatok kezelése, elemzése egy idősebb emberiséggel. Minden emberi tevékenységet megelőző valamely szintű elemzés a potenciális veszélyforrások, a felmerülő kockázatok azonosításával, a várható negatív következmények és a cselekvésből származó haszon szembeállításával összefüggésben. Nincs ez másképp a repülés területén sem. A kockázatok kezelése, a kockázatelemzések elkészítése, az azok alapján kialakított kockázatcsökkentő eljárások bevezetése, alkalmazása, nyomon követése és felülvizsgálata az egyik legfontosabb területe a légiközlekedés-biztonság szavatolását célzó szervezetekben folyó tevékenységnek.

Dudás tanulmányában úgy fogalmaz, hogy „a kockázatkezelés mindenkori célja egy adott szervezet működőképességének optimális szinten tartása, a működést károsan befolyásoló veszélyektől, illetve azok következményeitől, való megóvása útján. Ez a szervezet működését biztosító személyek egészségének, valamint a működéshez elengedhetetlen erőforrások megóvását jelenti” [5, p. 1]. Úgy látja, hogy akár a hétköznapi élet, akár a repülési tevékenység számtalan kockázatot rejt, ahol a fókuszpontot a kockázatkezelés első lépéseként a valódi, azaz nem felesleges kockázati tényezők felderítésére kell helyezni, a figyelmet azok azonosítására és értékelésére kell fordítani. A kockázatkezelés végső soron a tevékenység hordozta kockázat, vagyis valószínű káros következmény és a tevékenység szolgáltatja haszon egyensúlyának megtalálásáról szól [4, p. 2].

De mi is az a veszély, és mi is az a kockázat? A veszély vagy veszélyforrás és a kockázat kéz a kézben jár, de nem keverhető össze, nem ugyanazt jelenti. A veszély általánosan elfogadottan

<sup>1</sup> As low as reasonably practicable (ALARP).

egy olyan esemény, helyzet vagy történés, amely magában hordozza a sérülés okozásának, baleset bekövetkezésének lehetőségét.

A kockázat ellenben a sérülés bekövetkezésének valószínűsége szerint határozható meg. A kockázat alapelemei: a veszélyeztetettség, tehát a veszélynek való kitettség; a következmény, azaz a veszélynek való kitettségéből következő esemény súlyossága; valamint a káros esemény bekövetkezésének valószínűsége [5, p. 2].

A fentiek alapján látható, hogy a veszély nem feltétlenül jelentkezik kockázatként, amennyiben a bekövetkezés valószínűsége nem határozható meg, vagy a vizsgált potenciális sérülést elszenvedő személy kitettsége az adott veszélynek nulla.

Az ICAO<sup>2</sup> által elfogadottan a kockázatkezelés azon intézkedések sorozata, amelyek a repülésbiztonság szolgálatában magukba foglalják a veszélyforrások azonosítását, a kockázatok értékelését, a kockázatok csökkentését és a kockázat elfogadását. Ez folyamatosan végzett tevékenységet jelent, mivel a repülés, az azokra ható befolyásoló tényezők állandóan változnak, új veszélyforrásokat azonosíthatnak, illetve egyes veszélyforrások és a hozzájuk kapcsolódó repülésbiztonsági kockázatok idővel változhatnak, növekedhetnek, vagy éppen csökkenhetnek. A kockázatkezelésnek mindamellett figyelemmel kell kísérnie a végrehajtott kockázatcsökkentő stratégiák hatékonyságát, annak érdekében, hogy az esetleges további intézkedések szükségességéről döntenie lehessen [7, pp. 2-10].

Megvizsgálva a polgári és katonai (ICAO – NATO<sup>3</sup>) szabványokat [13, pp. 8-1 – 8-7], forrásokat [7, pp. 2-1 – 2-20], az ott található előírások szintézisével a repülésbiztonság területén a kockázatkezelés folyamata, rendszere az alábbiak szerint építhető fel [5, p. 2-3]:

1. *Veszélyforrások azonosítása* [13, p. 8-4]: Olyan releváns veszélyforrások azonosítását jelenti, amelyek kockázatot jelenthetnek a repülések végrehajtására. Ezek a veszélyforrások többfélék lehetnek: műszaki hibák, emberi hibázás, működési rendszerhibák vagy éppen környezeti tényezők.
2. *Kockázat értékelése* [13, p. 8-4]: A veszélyforrások azonosítását követően értékelni kell a velük kapcsolatos biztonsági kockázatokat. Ez magába foglalja a lehetséges balesetek vagy események bekövetkezési valószínűségének (relatív gyakoriságának) és a következmények súlyosságának értékelését. Ehhez különféle kockázatértékelési eszközöket és módszereket alkalmaznak, amelyek minőségi és mennyiségi mérőszámok meghatározásával lehetővé teszik azok valószínűségének és súlyosságának meghatározását.
3. *Kockázatok csökkentése, szabályozása* [13, p. 8-4]: A kockázatok értékelése után intézkedéseket kell kialakítani a kockázatok enyhítésére vagy csökkentésére. A hatékony kockázatcsökkentő intézkedések a kockázat három komponensének, azaz a valószínűség, a súlyosság és a veszélyforrásnak való kitettség – egységes vagy részenként történő – csökkentését célozza meg. Ez lehet új technológiák bevezetése, eljárások módosítása, ugyanakkor az általános rendszertervezésben további képzéseket vagy változtatásokat is jelenthet.
4. *Kockázatok elfogadása/döntéshozatal* [13, p. 8-4]: A repülési tevékenység során bizonyos kockázati szint elkerülhetetlen lehet, így különösen a katonai repülési feladatok végrehajtása során. A döntési helyzetben lévő felelős vezetőnek minden esetben

<sup>2</sup> Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (International Civil Aviation Organization).

<sup>3</sup> Észak-atlanti Szerződés Szervezete (North Atlantic Treaty Organization).

meg kell határozni azt a kockázati szintet, amely az elfogadható, tehát kezelést nem igénylő, és a valamilyen intézkedést igénylő kockázatok elválasztja egymástól. A repülési feladatok fontossága és sürgőssége függvényében döntést kell hoznia a kockázatok elfogadásáról vagy azok kikerüléséről, áthárításáról vagy kiterjesztéséről [5, p. 2]. A kockázat elfogadása azt jelenti, hogy a megállapított kockázat mellett végrehajtott feladat eredményeként várt hasznot összevetik az esetleges káros esemény bekövetkezésének súlyosságával, a veszteség mértékével, és ennek megfelelően hajtják végre a feladatot, igyekezve a kockázati szintet a megfelelő szinten tartani. A kockázatok kikerülése azt jelenti, hogy adott repülési feladatot nem hajtják végre, elkerülik a vele járó kockázatokat, ami a műveleti repülésben nem feltétlenül jelent opcionális megoldást. A kockázatok áthárítása esetén a lehetséges veszteséget, illetve kitettséget a rendszer más, az adott veszélyre vagy következményre kevésbé érzékeny tényezőire terhelik át, az adott repülési feladatot más eszközzel hajtják végre. A kockázat kiterjesztése esetén az adott feladat során a veszélyforrásnak való kitettség intenzitását, idejét próbálják meg csökkenteni [5, p. 2]. A döntéshozatal során figyelembe kell venni és értékelni kell a fennmaradó kockázatokat, amelyek esetleges magasabb szintje esetén további döntések meghozatala is szükséges lehet a kockázati szint megállapítása tekintetében.

5. *Kockázatcsökkentő eljárások alkalmazása* [13, p. 8-4]: A kockázatkezelési eljárás következő lépése a kiválasztott kockázatkezelési eljárás implementálása a feladat végrehajtásának menetébe. A kiválasztott kockázatcsökkentő eljárás a veszélyforrásnak való kitettség csökkentésével, a bekövetkezési valószínűség csökkentésével vagy a bekövetkezés esemény negatív hatásainak minimalizálásával operál.
6. *Nyomon követés, felülvizsgálat* [13, p. 8-4]: A repülési rendszer dinamikus, állandóan változik a technológia, a szabályozás, az üzemeltetési környezet, és módosulnak a végrehajtási eljárások is. A folyamatos monitorozás elengedhetetlen annak biztosításához, hogy a bevezetett kockázatcsökkentő eljárások idővel hatékonyak maradjanak. Ha a nyomon követés során az tapasztalható, hogy az alkalmazott kockázatcsökkentő eljárások nem hatékonyak, vagy ha új veszélyek merülnek fel, akkor a repülésbiztonság-irányítási rendszernek alkalmazkodnia kell. Ezt többek között a meglévő stratégiák felülvizsgálatával, új eljárások kidolgozásával vagy képzési programok továbbfejlesztésével lehet elérni.

A kockázatkezelés fontos eleme továbbá a kommunikáció, illetve a megfelelő jelentési rendszer kialakítása, amely alapvetően a repülésbiztonság-irányítási rendszer részét képezi. Az azonosított veszélyforrásokról, kockázatértékelésekről és kockázatcsökkentő eljárásokról hatékony kommunikációt kell folytatni, amely létfontosságú a szervezet belső működtetésében. Emellett olyan belső jelentési rendszert kell működtetni, amely ösztönözi a munkavállalókat az esetleges biztonsági problémák, kételyek, események vagy balesetnek nem vezető események bejelentésére, elősegítve ezzel a proaktív megközelítést a biztonság terén.

A fenti kockázatkezelő rendszer a NATO-ban elfogadott Pozitív Repülésbiztonsági Kultúra részét képezi [13, p. 3-1].

A kockázatelemzések, kockázatértékelések elvégzése kvantitatív (mennyiségi), illetve kvalitatív (minőségi) módszereken alapul.

A kvantitatív módszerek a valószínűségszámításra, az adatbázisokban rendelkezésre álló, akár több évtizedet átölelő adatokra támaszkodnak, azaz ezekben az esetekben a kockázatot jellemző valószínűség értékének meghatározására van lehetőség [10, p. 337]. A számítások során a kockázatomátrix használata lehetővé teszi a felhasználónak, hogy kvantitatív formában kifejezze az azonosított veszélyekkel kapcsolatos biztonsági kockázatokat, aminek segítségével közvetlen nagyságrendi összehasonlítást lehet tenni az azonosított biztonsági kockázatok között [7, p. 9–17].

A kockázátértékelések során néha szükséges a pontos számítások elvégzése helyett a minőségi/kvalitatív információk (szakértői vélemények) felhasználása a mennyiségi/kvantitatív adatok hiánya miatt. Így a kvalitatív módszerek alapvetően a korábban meglévő tapasztalatokra alapoznak. Minden olyan azonosított biztonsági kockázathoz, amelynél nem áll rendelkezésre mennyiségi adat, rendelkezhető egy minőségi biztonsági kockázátértékelési verbális kategória, például az, hogy a negatív hatású esemény bekövetkezése „valószínűsíthető” vagy éppen „valószínűtlen” [7, p. 9–17].

A kockázátértékelések elvégzése (akár kvantitatív vagy akár kvalitatív módszerrel) többnyire cikluszerű folyamat, amelynek lépéseit többször is el kell végezni egymás után ahhoz, hogy a megfelelő minőségű eredményt kaphassuk.

Ennek megfelelően a kockázatok kezelésére más megközelítésben objektív és szubjektív eljárásrendek állnak rendelkezésre. Így az objektív eljárásrendhez szükség van megfelelő adatbázisra, időre, megfelelő technikai háttérre, illetve valamely, az eljárást biztosító matematikai háttérre – kvantitatív eljárások. A szubjektív kockázatkezeléshez ugyanakkor a döntéshozó személyes tapasztalataira, előzetes ismereteire, intuíciójára, valamint az egyéni preferenciákra – kvalitatív eljárások [6, p. 233].

## 4. Kockázatelemzési eljárások

Ahogy korábban megállapítottuk, a kockázat a légi közlekedési balesetek és események bekövetkezésének valószínűségével, az esemény súlyosságával, a potenciális veszteségnek vagy ártalomnak kitett személyek és eszközök kitettségével fejezhető ki. A kockázat általánosan a valószínűség, a súlyosság és a kitettség függvényében vizsgálható és határozható meg [15, p. 69].

A kockázatelemzési eljárások mellett, hogy felhasználhatók egy jövőbeni légi közlekedési esemény kockázatainak meghatározására, egy már bekövetkezett légi közlekedési esemény analizálására is megfelelő eszközt nyújtanak. Így végre lehet hajtani velük baleseti vagy eseményelemzéseket, amelyek egy adott veszteség okának azonosítását teszik lehetővé annak érdekében, hogy a hasonló veszteségek megelőzhetők legyenek. Emellett elvégezhetők olyan elemzések, amelyek a még meg nem történt balesetek potenciális veszélyforrásait azonosítják, tárják fel, annak érdekében, hogy megelőzzék azok bekövetkezését, vagy ha ez nem lehetséges, akkor csökkentsék a hasonló kárt okozó esemény bekövetkezési valószínűségét [11, p. 2].

A repülésbiztonság területén a kockázat elemzésére, szemléltetésére számtalan lehetőség kínálkozik. Figyelemmel arra, hogy a biztonság kérdése több tudomány területén jelen van, az alkalmazott kockázatelemzési/-értékelési eljárások nemcsak a repülésbiztonság területéről, hanem többek között az iparbiztonság (például olajipar, veszélyes anyagokat gyártó üzemek,

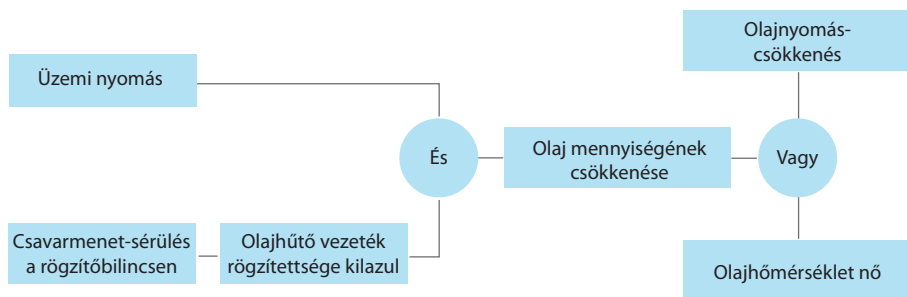
nukleáris üzemek), az információbiztonság, vagy éppen a gazdasági és pénzügyi folyamatok kockázatkezelési eljárásaiból is érkezhettek.

Kijelenthető ugyanakkor, hogy bármely módszert is tekintjük át, mindegyikben megjelenő közös elem, hogy a felmerülő kockázatokat, illetve annak következményeit, illetve kiváltó okait valamilyen módon megpróbálja rangsorolni [6, p. 232].

A légi közlekedés veszélyes üzem, ennek megfelelően a nemzetközi szervezetek nagy hangsúlyt fektetnek a légi közlekedés biztonságának szavatolására. Az ICAO DOC 9859 alapján minden olyan légi közlekedéssel foglalkozó üzemeltetői és üzemeltetői szervezetnek, szolgáltatónak feladata egy biztonsági kockázatértékelési modell kidolgozása és kapcsolódó eljárások alkalmazása, amelyek következetesen és szisztematikusan lehetővé teszik a biztonsági kockázatok értékelését. Ennek magában kell foglalnia egy módszert, amely segít meghatározni, hogy mely biztonsági kockázatok elfogadhatók vagy elfogadhatatlanok, és hogy mely (kockázatcsökkentő) intézkedéseket kell prioritásként kezelni [7, p. 9–17].

## 5. Lineáris kockázatelemzési eljárások

A kockázatelemzések elvégzésének legtöbb módszere a lineáris kudarcesemény/hibaesemény modellen<sup>4</sup> alapul, amely abból a feltételezésből indul ki, hogy egy fő eseményt/balesetet több hibás esemény által képzett láncolat okozza, azaz minden egyes hiba közvetlen következménye az előzőnek. Ebben az eseményláncolatban beépíthetők logikai „vagy” és/vagy „és” kapuk, azaz az események láncolatába konjunktív, illetve vaglyagos feltételek is behozhatók.



1. ábra

Olajhűtő vezeték rögzítőbilincs csavarsérülésének láncolata (a szerző [11] alapján)

A fenti ábrán levezethető, hogy a kenőolaj mennyiségének csökkenése visszavezethető az olajhűtő vezetékrögzítő bilincs csavarjának sérülésére, aminek hatására a vezeték kilazul. Az üzemi nyomás megjelenésével a rendszerben az olaj mennyisége csökken, ami végső soron nyomáscsökkenéshez, illetve hőmérséklet-növekedéshez vezethet.

Leveson tanulmánya szerint az LCFEM-modellek esetében a balesetek megelőzésének legegyszerűbb megoldása, ha megszüntetnénk a láncolatba felfűzött egyik eseményt [11, p. 2]. Azaz, ha megszüntetnénk a vezeték rögzítettségének kilazulását attól függetlenül, hogy a csavar sérült-e vagy sem, például azzal, hogy más rögzítési eljárást alkalmazunk (rugós bilincs).

<sup>4</sup> Linear Chain of Fault Event Model (LCFEM).

Ugyanakkor szerintem egy másik lehetőség az, ha az események közé akadályokat helyezünk, hogy az egyik esemény következményei ne vezessenek a lánc következő eseményéhez. Akadály lehet például egy új ellenőrzési eljárás bevezetése vagy egy érzékelő szenzor beépítése.

Ez a gyakorlat jellemzően a nukleáris energiatermelésben és más olyan iparágakban érhető tetten, amelyek „többrétegű védekezést” alkalmaznak a balesetek megelőzése érdekében. Ez a „többrétegű védekezés” egy olyan biztosítási rendszer kiépítését jelenti, amelyben minden egyes védekező mechanizmust egy másik védekező mechanizmus biztosít [11, p. 2].

Leveson kiemelte továbbá, hogy az LCFEM modell esetén az események között közvetlen ok-okozati összefüggésnek kell fennállnia, vagyis minden felvázolt esemény a láncban következő eseményhez vezet, amelynek fontos eleme, hogy a láncban az előző esemény mindig szükséges és elégséges feltétele a következő esemény bekövetkezésének.

Egy bekövetkezett veszteség vizsgálatára alkalmazva az LCFEM modellt látható, hogy az elemzés visszafelé halad a veszteséget okozó eseménytől annak érdekében, hogy az ok-okozati láncot azonosítva meghatározza a kezdeti eseményt, amelyet „root cause”-nak, vagy „gyökér oknak”, „fő oknak” neveznek. Fontos kiemelni, hogy a feltárást végző láncban a fő oknak jelölt esemény nem feltétlenül az első dokumentált esemény. A fő ok keresés folyamatának megállapítása nem nélkülözi a szubjektumot, többnyire az analízist végző dönti el, hogy meddig halad a keresésben. Emiatt a keresés visszafelé halad addig a pontig, amíg valami nem kerül a felszínre, ami könnyen megelőzhető, vagy amíg a keresés már csak nehezen folytatható visszafelé [11, p. 3].

### 5.1. Hibafa-analízis

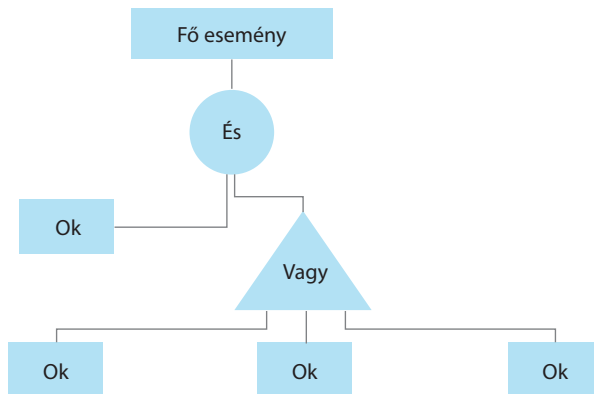
Az LCFEM-modellek közé tartozó hibafa-analízist a nem kívánt események kiváltó okainak feltérképezésére alakították ki, először 1962-ben alkalmazták [3, p. 2] az Egyesült Államokban, amely alapvetően a repülőgépgyártás és az űrkutatás területén terjedt el. A hibafa-módszer a U.S. Air Force Ballistics Systems Division és a Bell Telephone Laboratories közötti szerződés eredménye volt a Minuteman ICBM<sup>5</sup> nem szándékolt indításának tanulmányozására. Az elkészült tanulmány eredményeit<sup>6</sup> a Minuteman I. tervezésénél nem tudták már felhasználni, hiszen abban az időben már a gyártási fázisban volt, de a kialakított eljárásrendet és annak eredményeit a Minuteman II. esetében sikeresen alkalmazták [3, p. 6].

A hibafa egy olyan rendszerezett grafikus módszer, amelyet a rendszerhibák okainak és hatásainak elemzésére használnak. Segít azonosítani a potenciális hibamódokat egy rendszerben és értékelni ezeknek a hibáknak a bekövetkezési valószínűségét.

A hibafa-elemzési módszer az eseményeket a súlyos balesetbe vezető berendezésmeghibásodásokra és az emberi tévedésekre bontja fel. Ez a módszer ezért egy fordított gondolkodási technika, azaz az elemző a súlyos balesetből vagy a nem kívánt eseményekből indul ki. Ahhoz, hogy ezek az események elkerülhetők legyenek, meg kell határozni az eseményt közvetlenül kiváltó okokat, amelyeket sorba véve megállapítható az eseményhez vezető alapvető (gyökér) ok(ok).

<sup>5</sup> Interkontinentális ballisztikus rakéta (Intercontinental Ballistic Missile).

<sup>6</sup> Launch Control Safety Study.



2. ábra  
Hibafa (a szerző [3] alapján)

A hibafa olyan ábra, amely szemlélteti az alapvető okokat, továbbá az okok és a baleset közötti összefüggéseket. A hibafaelemzések során logikai kapcsolat jelölésével mutatják be, hogy bizonyos események együttes előfordulása eredményezhet-e negatív kimenetelt, ami további negatív eredményeket hozhat-e, ami végül a „csúcsesemény” vagy „fő esemény” mint lehető legrosszabb következmény megvalósulásáig vezethet-e [12, p. 207].

A Texas A&M University 1970-ben kiadott kézikönyve alapján látható, hogy már abban az időben is kialakítottak egy (Monte Carlo-eljárással működő) számítógéppel támogatott hibafaeljárást, amely a következő hat alapvető lépésből állt:

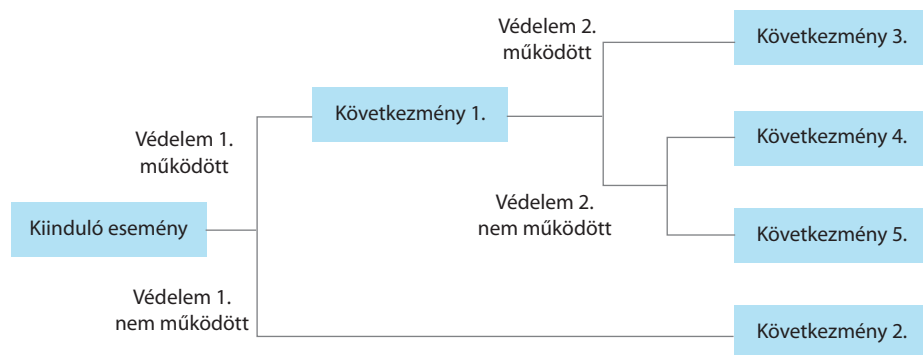
1. meg kell határozni a vizsgálni kívánt, úgynevezett csúcseseményt;
2. meg kell érteni a vizsgált rendszert a működés feltételei alapján;
3. el kell készíteni a hibafa-diagramot, amely magában foglalja az összes lehetséges hibát, amely a csúcseseményhez vezethet;
4. össze kell gyűjteni a kvantitatívhiba-adatokat, azaz meg kell határozni a fa legalsó részén lévő események bekövetkezési valószínűségeit, amelyek a meglévő tapasztalatokból, tesztekkel, publikált adatokból vezethetők le;
5. értékelni kell a csúcsesemény bekövetkezési valószínűségét;
6. analizálni kell a számítógép által kiszámított eredményeket [3, p. 9].

A számítógéppel végrehajtott elemzés hátterét a Boolean-algebra leképezése biztosította. Vas értékezése szerint:

„A hibafa elemzés erőssége, hogy beazonosítható és számszerűsíthető a nem független, akár emberi hibából fakadó meghibásodás valószínűsége és oka. A hibafa modell fentről lefelé haladva követi végig a meghibásodáshoz vezető útvonalat és elemeket. A rendszer gyenge pontjainak meghatározásához, azoknak az eseményeknek a halmaza kerül beazonosításra, melyek együttes bekövetkezésekor a csúcsesemény is bekövetkezik, illetve azon események halmaza is melyek közül, ha egyik sem következik be, akkor a csúcsesemény sem. A hibafa elemzése előnye, hogy lehetővé teszi kombinált hibák bekövetkezésének felderítését komplex rendszereken” [17, p. 96].

## 5.2. Eseményfamodell

1967-ben kezdték az amerikai nukleáris erőművek biztonsági elemzéseire alkalmazni a hibafaeljárást. Amikor a hibafaeljárással elkészített elemzések mérete a rendszerek komplexitása miatt kezelhetetlenné vált, a fordított keresési technika helyett az előre haladó lineáris keresési technika alkalmazásával kialakították az eseményfamodellt. Itt a kiinduló esemény egy lehetséges veszélyforrás, és a modell kialakítása során az ebből eredeztethető következményeket veszik sorba. Az eseményfa az összes lehetséges kimenetelt megmutatja, amelyek a veszélyből és a védelmi eszközök hibáiból következhetnek be. Az eseményfa kialakítása során beilleszthetők az egyes eseményágak bekövetkezésének valószínűségi adatai is [11, p. 12].



3. ábra  
Eseményfa (a szerző [11] alapján)

Leveson szerint ebben a kontextusban csak a veszélyes esemény bekövetkezése utáni eseménylánc bemutatása értelmezhető, a veszélyek megelőzése ugyanakkor nem, mivel az eseményfa alkalmazása során egyes folyamatok, rendszerek tervezése, illetve biztonságértékelése áll a fókuszpontban, amelynél a hangsúly egy veszélyes esemény bekövetkezése utáni helyreállításon van, nem pedig a veszély megelőzésén [11].

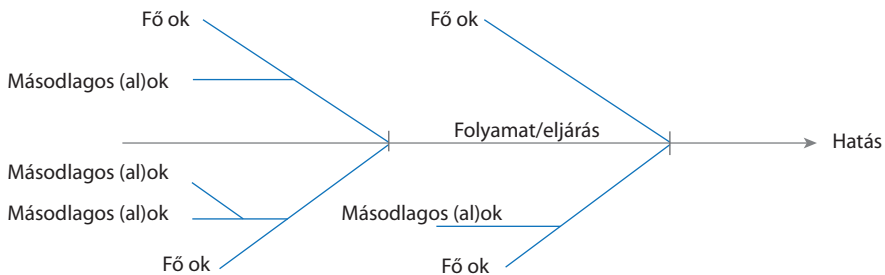
Ez alapján az eseményfák csak olyan rendszerek esetében használhatók jó eredménnyel, ahol a védelmi rendszereket beépítették, azaz van arra lehetőség, hogy a rendszer működése biztonságos állapotba át-, illetve visszatérhessen. Ez a repülés területén nem minden esetben elérhető [11].

## 5.3. Ishikawa-diagram

Az LCFEM-modellekhez kapcsolható Ishikawa-diagramot vagy ismertebb nevén a „halszálla diagramot” Kaoru Ishikawa, japán minőségbiztosítási szakember fejlesztette ki az 1960-as években. Az Ishikawa-diagram segítségével egy probléma összetevőit vagy okait lehet azonosítani és vizualizálni, így segítve a döntéshozatalt azzal, hogy segítségével a döntés-előkészítő megkeresheti, azonosíthatja a problémákhoz vezető okokat, és a döntés meghozatalához a megfelelő megoldást találhatja meg.



Az Ishikawa-diagramot széles körben alkalmazzák különböző iparágakban, az egészségügyben, a minőségirányításban, a problémamegoldásban, az egyes gyártási/termelési folyamatok javításában, valamint a projektek tervezésében és végrehajtásában.



4. ábra

4 fő okra vezethető halszálla- vagy Ishikawa-diagram (a szerző [14] alapján)

A módszer szemlélteti egy adott folyamathoz kapcsolódó hatások fő és másodlagos okait, valamint a következmény és az előfordulásához vezető tényezők közötti kapcsolatot, azokat az okokat feltárva és azonosítva, amelyeknél elégtelen mennyiségű információ áll rendelkezésre, vagy az egyéb indokok miatt a folyamat nem halad előre a tervezett módon. Egy bonyolultabb folyamat vizsgálata során az elemzést minden fázisra és szakaszra el kell végezni [14, p. 42].

A módszer gyakorlatilag pillanatképet készít egy adott folyamatról, áttekintést nyújtva és kiemelve az ok-okozati összefüggéseket a folyamatokat befolyásoló tényezők részleteinek megállapításával, valamint azoknak a területeknek a feltárásával, amelyek további információkat igényelnek, így jelezve, hogy hol helyezkednek el azok a pontok, ahol változtatás szükséges [14, p. 43].

A légi közlekedésre lebontott Ishikawa-diagram öt fő okot vizsgálhat:

- ember: pszichofizikai jellemzők, készségek, stressztűrés, személyiségi vonások;
- környezet: védelem hiánya a természeti jelenségekkel szemben, időjárási körülmények, üzemeltetési területek, munkakörülmények, repülőtéri infrastruktúra;
- gép: (repülőgép megbízhatósága, teljesítménye és ergonómiája), műszaki eszközök rendelkezésre állása (idő, eszközök, alkatrészek elérhetősége), logisztika (fogyóeszközök ellátása, karbantartási költségek), műszaki dokumentáció (értelmezhető, egyértelmű eljárások, dokumentáció elérhetősége);
- küldetés: (egyértelmű, meghatározott, megvalósítható) feladat célja, feladat teljesítése a modell elemeinek kölcsönös hatása révén;
- szervezeti irányítás: a légi közlekedési szervezet hatékony irányítási és vezetési rendszere, megfelelő személyzet kiválasztása, világos előléptetési szabályok, hangsúly a megfelelő eljárások megtanulására, amelyek érvényben vannak az adott légi közlekedési szervezetben [9, p. 132].

Ahogy korábban már említettem, a halszállkamodellt mint szemléltetőeszközt a minőségbiztosítás és minőségirányítás területén használták először, ugyanakkor az alkalmazása értelmezési problémákat okozott, mert hibafaként próbálták kezelni, úgy akarták használni, mint egy faelemzést. Ez azonban helytelen megközelítés volt, mivel a faelemzés egy nem

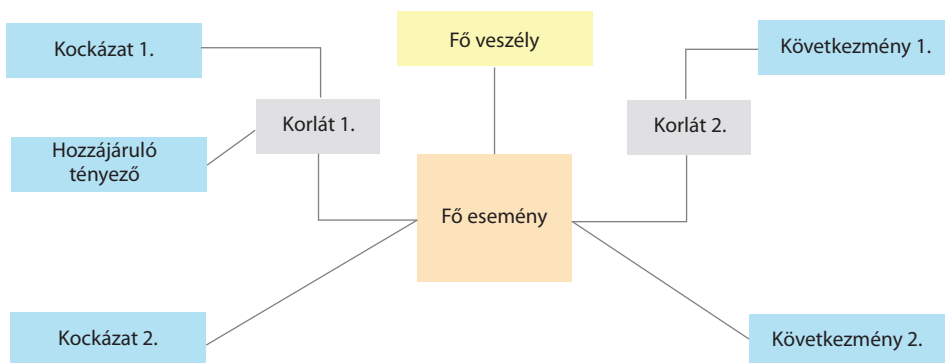
kívánt esemény elemzésére formális logikai szimbólumokat használ, és így az ok-okozati összefüggések kutatására alkalmas. Az Ishikawa-diagram ettől eltérően egy eszköz a nem kívánt esemény körülményeinek felvázolására, a lehetséges okok felsorolására; de anélkül, hogy figyelembe venné az egyes szakaszokat vagy okokat. Ezt a lényeges különbséget a két módszer között ki kell emelni, mivel az Ishikawa-diagram (mint grafikus ábrázolás) egyetlen szerepe az, hogy felfedezze és vázolja a folyamat struktúráját és összetevőit, amelyek felhasználhatók a kockázat azonosításában [14, p. 43].

#### 5.4. „Bow-tie” vagy csokornyakkendő-modell

A kockázatok áttekintésére, elemzésére, szemléltetésére használható további módszer a „bow-tie” vagy csokornyakkendő-módszer, amelyet végleges formájában az 1990-es években az olajiparban alakítottak ki annak érdekében, hogy a kockázatokat szemléletesebben meg tudják jeleníteni. Ez az eljárásrendszer alapvetően angolszász területen terjedt el a polgári és katonai légi közlekedésben egyaránt [2]. Alapját az ok-következmény elemzés adta, felhasználva a hibafa-, eseményfa- és a halszákladigram elemzési módszereit egyaránt.

Az eredeti bow-tie mint ok-következmény diagram Bob Taylor munkája volt az 1970-es években, aki kombinálta a hibafát és az eseményfát, közéjük helyezve a veszélyforrást mint kritikus/fő eseményt [11, p. 15].

A lenti ábrán egy bow-tie modell látható, amely a Taylor-modellnek megfelelően a szervezetre leselkedő veszélyforrás (fő veszély) következtében bekövetkező fő eseményt jeleníti meg középen, amelytől balra a reaktív – hibafa – oldalon a különböző fenyegetettségek/kockázatok, jobbra a proaktív – eseményfa – oldalon pedig a következmények helyezkednek el.



5. ábra  
Leegyszerűsített „csokornyakkendő-modell” (a szerző [8] alapján)

A bow-tie diagramon a kockázatok és a fő esemény között a proaktív biztonsági akadályok/korlátok jeleníthetők meg, amelyek csökkentik az esemény bekövetkezési valószínűségét. A reaktív oldalon a bekövetkezett esemény és a következmények között reaktív biztonsági akadályok/korlátok vannak, amelyek csökkentik a bekövetkezett esemény hatásait, illetve azok súlyosságát.

A fentiek alapján tehát, a bow-tie diagram elkészítésénél első lépésben azonosítani kell a veszélyforrást, amely alapvetően meghatározza a kockázatértékelés körét és összefüggéseit. A következő lépés a fő esemény meghatározása, amely annak következménye, ha a veszély fölött meglévő irányítás vagy ellenőrzés elvész, azaz a beépített akadályok/korlátok nem működnek. Az így kialakított ábrán a bow-tie diagram középpontját ez a fő esemény képezi, és összekapcsolja a hibafa- és eseményfa-elemzéseket.

A fő eseményt így egy vagy több fenyegetés/veszély okozhatja, amelyek olyan okokban eredeztethetők, amelyek a fő esemény kiváltásához vezethetnek, ha a fenyegetés ágán lévő összes megelőző akadály/korlát működése kudarcot vall.

A fő esemény bekövetkezése ugyanakkor egy vagy több következményhez vezethet. Ezek a következményágak a fő esemény jobb oldalán vannak ábrázolva. A következmények lehetséges események vagy eseménysorok, amelyek negatív hatással lehetnek a folyamatra, ilyen például az irányításvetés, a kár vagy sérülés okozása. A károk minimalizálására korlátok/akadályok, más néven „vezérlők” vagy „védelmi rétegek” alkalmazhatók [1, p. 3].

A fenti diagramot egyes légi közlekedési események vizsgálata során alkalmazva, a lényeges információk megjelenítésével lehet kiértékelni az események ok-okozati összefüggéseit, illetve kockázatelemzés elkészítése során megfelelő vizualizációval lehet elősegíteni a megfelelő döntések meghozatalát.

Ugyanakkor Leveson szerint a repülés területén az utóbbi időben egyszerűsíteni próbálják a bow-tie alkalmazását azzal, hogy kihagyják az elemzési lépéseket, és az elemzést a csokornyakkendők rajzolásával kezdik meg. Ez azonban nehezé teszi a csokornyakkendőbe felvitt információk megértését, nehezen azonosítható, hogy miként jöttek létre ezek az információk, és ez csak nagyon ad hoc, strukturálatlan és emiatt némileg megbízhatatlan megközelítést tesz lehetővé, amely sokkal inkább a szubjektum felé mutat [11, p. 17].

Emellett a bow-tie és az egyéb LCFEM-alapú elemző módszer egyik legnagyobb hátránya, hogy komplex rendszereknél óriási méretűre nőnek, nehezen kezelhetők. Ennek megfelelően arra sarkallják a készítőket, hogy egyszerűsítsenek, adott esetben a hibafa oldalon elhagyják az „ÉS” kapcsolattal szereplő okokat, és minden hozzárendelt helyreállító intézkedést elhagyjanak a jobb (eseményfa) oldalon. Ez ebben a formában eliminálja a hibafák és az eseményfák minden olyan pozitív és részletekbe menő tulajdonságát, amely a részletes hibás események ok-okozati láncainak bemutatására irányul. A lineáris modellek ugyanakkor nem képesek előállítani vagy bemutatni a mai balesetekben fontos nem lineáris ok-okozati összefüggéseket. A mai összetett rendszerek vonatkozásában a lineáris ok-okozati feltételezéseken alapuló elemzési technikák által előállított alapvető táblázatok és adatbázisok vélelmezhetően hiányosak, függetlenül attól, hogy milyen módszerrel vannak megjelenítve [11, pp. 18–19].

## 6. Összegzés

A repülés mint tevékenység végzése nem mentes a rá leselkedő veszélyforrásoktól és az azok által megjelenő kockázatoktól. Ahhoz, hogy a repülésbiztonság szavatolható legyen, a kockázatokat azonosítani, értékelni kell, illetve a kockázatoknak való kitettséget, a bekövetkezési valószínűséget vagy a bekövetkezett események súlyosságát kezelni szükséges. A kockázatok elemzésére kvalitatív és kvantitatív eljárásokat alkalmaznak, a meglévő tapasztalatok, illetve a rendelkezésre álló adatok számításával igyekeznek elérni a kívánt eredményt, a kockázatok

felmérését, kezelését, vagy éppen a légi közlekedési események okainak elemzését, meghatározását. A cikk első részében rövid áttekintést kívántam adni a lineáris, ok-okozati kockázatelemzési eljárások 1960-as évektől kezdődő fejlődéséről, illetve az alkalmazásuk pozitívumairól és esetleges hátrányairól. Azt látni kell, hogy a repülés, vele együtt a kockázatok értékelése, elemzése, kezelése is folyamatosan fejlődik. 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 egyre nagyobb kihívásokat jelentenek. A lineáris modellek korlátai miatt e rendszerek analízise csak egyszerűsítve dolgozható fel, és szükség van az összetett rendszerek elemzését is lehetővé tevő technikák megismerésére.

A jelen cikk folytatásában (*A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója II.*) többek között bemutatjuk a lineáris folyamatelemzési eljárások mellett megjelenő, a bonyolult, többszörösen összetett rendszereket leíró rendszerelméleti baleseti modell és folyamatokra épülő<sup>7</sup> folyamatelemzés<sup>8</sup> és ezen alapuló okelemzési<sup>9</sup> eljárások alkalmazásának lehetőségeit, illetve a szintén ezen rendszerek folyamatait vizsgáló Erik Hollnagel-féle funkcionális rezonancia baleseti modell<sup>10</sup> repülésbiztonsági alkalmazásának vizsgálatát.

## Felhasznált irodalom

- [1] J. Aust, D. Pons, „A Systematic Methodology for Developing Bowtie in Risk Assessment: Application to Borescope Inspection,” *Aerospace*, 7. évf. 7. sz. 2020. Online: <https://doi.org/10.3390/aerospace7070086>
- [2] Civil Aviation Authority (CAA), *Bowtie Risk Assessment Models*. [é. n.]. Online: [www.caa.co.uk/Safety-Initiatives-and-Resources/Working-with-industry/Bowtie/](http://www.caa.co.uk/Safety-Initiatives-and-Resources/Working-with-industry/Bowtie/)
- [3] T. W. DeLong, *A Fault Tree Manual*. Texas A&M University, 1970. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0739001.pdf>
- [4] Dudás Z., „Az információ fontossága a repülésbiztonságban,” *Repüléstudományi Közlemények*, 17. évf. 2. sz. pp. 1–10. 2005. Online: [www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005\\_cikkek/dudas\\_zoltan.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/dudas_zoltan.pdf)
- [5] Dudás Z., „Repülésbiztonsági kockázat, repülésbiztonsági felelősség,” *Repüléstudományi Közlemények*, 21. évf. 2. sz. pp. 1–8. 2009. Online: [www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009\\_cikkek/Dudas\\_Zoltan.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Dudas_Zoltan.pdf)
- [6] Fenyvesi Cs., Pokorádi L., „Üzemeltetési folyamat kockázatát befolyásoló tényezők elemzése,” *Repüléstudományi Közlemények*, 26. évf. 2. sz., pp. 232–246. 2014. Online: [www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014\\_cikkek/2014-2-20-0124\\_Fenyvesi-Cs-Pokoradi\\_L.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-20-0124_Fenyvesi-Cs-Pokoradi_L.pdf)
- [7] International Civil Aviation Organization (ICAO), *DOC 9859, Safety Management System*. Fourth Edition, Montreal, 2018.

<sup>7</sup> System-Theory Accident Model and Process (STAMP).

<sup>8</sup> System-Theory Process Analysis (STPA).

<sup>9</sup> Causal Analysis based on System-Theory (CAST).

<sup>10</sup> Functional Resonance Accident Model ~ FRAM.

- [8] Jackovics P., „Kötéltechnikai mentés során bekövetkezett baleset elemzése Csokornyakkendő analízissel”, in *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Engineering Symposium at Bánki*, Budapest, Óbudai Egyetem, pp. 1–13. 2016. Online: <http://real.mtak.hu/42378/1/35.pdf>
- [9] M. Jemielniak, „A Study of Aviation Incidents Involving Military Aircraft”, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21. évf. 1. sz. pp. 127–136. 2014. Online: <https://doi.org/10.5604/12314005.1133886>
- [10] Leskó Gy., „A civil kockázat-elemzési módszerek lehetőségei a katonai műveletek környezeti hatásértékelése során”, *Hadmérnök*, 14. évf. 2. sz. pp. 335–346. 2019. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.2.28>
- [11] N. G. Leveson, *Shortcomings of the Bow Tie and Other Safety Tools Based on Linear Causality*. Nancy's white papers, MIT Partnership for System Approaches to Safety and Security (PSASS), Massachusetts Institute of Technology, 2019. Online: <http://sunnyday.mit.edu/Bow-tie-final.pdf>
- [12] Megyer L., Farkas T., „Kockázatkezelés, tudomány vagy kuruzslás?” *Hadmérnök*, 12. évf. 3. sz. pp. 198–209. 2017. Online: [http://hadmernok.hu/173\\_18\\_megyeri.pdf](http://hadmernok.hu/173_18_megyeri.pdf)
- [13] NATO, *NATO Standard AFSP-01 Aviation Safety Ed. C, Ver. 1*. (STANAG 7160 Ed. 5.), Bruxelles, NATO Standardization Office (NSO), 2023.
- [14] C. V. Pietreanu, V. M. Iordache, „Qualitative and Quantitative Assessment of Risks Associated to HELIOS HP 03-2 Unmanned Aerial Vehicle Developed by NASA”, *Scientific Bulletin*, Series D: Mechanical Engineering, 80. évf. 2. sz. pp. 39–50. Online: [www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/reza7f\\_822664.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/reza7f_822664.pdf)
- [15] Pokorádi L., „Kockázatkezelés a repülésben”, *Repüléstudományi Közlemények*, 11. évf. 26. sz. pp. 65–77. 1999. Online: [www.epa.hu/02600/02694/00023/pdf/EPA02694\\_rtk\\_1999\\_01\\_065-077.pdf](http://www.epa.hu/02600/02694/00023/pdf/EPA02694_rtk_1999_01_065-077.pdf)
- [16] Rohács J., Horváth Zs. Cs., „A repülésbiztonság problémája és fejlesztési elvei”, *Repüléstudományi Közlemények*, 25. évf. 3. sz. pp. 39–55. 2013. Online: [www.repules-tudomany.hu/folyoirat/2013\\_3/2013-3-05-Rohacs\\_J-Horvath\\_Zs-Cs.pdf](http://www.repules-tudomany.hu/folyoirat/2013_3/2013-3-05-Rohacs_J-Horvath_Zs-Cs.pdf)
- [17] Vas T., *A Magyar Honvédség mobil légiforgalom szervezési komponens kialakításának és alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Doktori (PhD-) értekezés. Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, 2019. Online: <https://doi.org/10.17625/NKE.2019.032>

---

## ***The Evolution of Risk Analysis in Aviation Safety I.***

*As many hazardous operations, aviation also can be carried out along acceptable and unacceptable (would be manageable) risks. The purpose of writing this series of articles is to introduce and review the risk analysis procedures that have emerged since the 1960s, their possible interdependence and their usefulness. The first part of the article series deals basically with the initial steps and linear risk analysis procedures. Describes the risk analysis and visualisation procedures that did not necessarily originate in aviation, but which, when transferred and applied to the field of aviation safety, contribute to enhancing aviation safety. The chosen research method primarily relied on processing domestic and foreign literature from the field of safety and risk assessment.*

**Keywords:** *aviation, safety, risk assessment, risk management, fault tree, event tree, Ishikawa diagram, linear chain of fault event model*

---

Beller Balázs  
vezető kiemelt főtitzt  
HM Állami Légügyi Főosztály  
Repülésbiztonsági és Repülőtérfelügyeleti  
Osztály  
[balub77@gmail.com](mailto:balub77@gmail.com)  
[orcid.org/0009-0009-6117-1026](https://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](mailto:balub77@gmail.com)  
[orcid.org/0009-0009-6117-1026](https://orcid.org/0009-0009-6117-1026)

---



Schuster György

## A biztonságkritikus fejlesztésben alkalmazott módszertanok

*Amióta a számítógépeket irányítástechnikai feladatok elvégzésére használjuk, az a célunk, hogy mind hardveres, mind szoftveres szempontból a működésbiztonságuk a kívánt mértékeknek megfelelő legyen. Azt könnyen beláthatjuk, hogy egy nehezen meghatározható szint felett a szoftverek bonyolultsága már annyira magas, hogy azokat lehetetlen átlátni és követni, és mint azt több előző cikkben is megírtuk, kellő mértékben tesztelni. Ebben az írásban rövid történeti összefoglalás után a manapság használt fejlesztési módszertanokkal foglalkozunk, kiemeljük célszerű alkalmazási területüket és főbb jellemzőiket. Mintapéldákat mutatunk be, hogy az egyes tárgyalt módszertanokat hol és hogyan alkalmazhatjuk a repülésben.*

**Kulcsszavak:** működésbiztonság, szoftverfejlesztés

### 1. Bevezetés

Az elektronikus számítógépek irányítástechnikai feladatokra való felhasználása azonnal nyilvánvalóvá tette, hogy a kezdetleges programozási eljárások nem megfelelőek. Az 1940-es évek végén az ENIAC elektronikus számítógépet még a klasszikus analóg számítógépekhez hasonló plug-board és huzalozás segítségével programozták [11]. Ez a módszer nagyon körülményes, nagyon nehézkes, nehezen tesztelhető és egyáltalán nem hatékony. Ezért a szakemberek más megoldást kerestek, programozási nyelveket alkottak, és elkezdtek a számítógépeket használni a számítógépek programozására. Azonban ebben az időben arra is rádőbrentek, hogy a bonyolultsági szint annyira megnőtt, hogy egy-egy hiba gyökerét nagyon nehéz megtalálni. Ekkor történt annak a manapság furcsának tűnő megoldásnak a használata, hogy a nagy megbízhatósági igényeket kielégítő programokat kézzel fordították le sorról sorra. Természetesen ezek a programok assembly szinten íródtak. Számos üreszköz rendszerprogramja készült így. Ez másik oldalról egészen jól illeszkedett az akkori hardvertechnológiákhoz, lásd ferritmagos memória.

Az alkalmazott módszertan ebben az időben az úgynevezett programozás kipróbálás „modell” volt. Ez azt jelenti, hogy megírjuk a programot, majd teszteljük, és a felmerülő hibákat javítjuk. Ezt addig csináljuk, amíg a program megfelelően nem működik. Ez kicsi és egyszerű programok esetén működik, de ha a program nagy, akkor a sok javítás miatt követhetetlen lesz, és minden egyes javítás újabb hiba lehetőségét rejtje magában. Minél nagyobb a program



és minél több funkciót lát el, annál nagyobb a kockázat. Ez a magasabb szintű programozási nyelveknél is alkalmazott módszer volt.

Természetesen a magas szintű programozási nyelvek esetén a kézi fordítás már nem volt járható út.

Az 1960-as évek végére nyilvánvalóvá vált az a tény, hogy így már nem lehet továbblépni. Ezt felismerve több kutató, E. W. Dijkstra, C. A. R. Hoare, Niklaus Wirth, megfogalmazta a strukturált programozás alapötletét. Eszerint: „A program nem más, mint absztrakt algoritmusok megfogalmazása meghatározott adatszerkezeteken”, vagy Niklaus Wirth megfogalmazásában:

Algoritmusok + Adatstruktúrák = Program [13].

A tervezés folyamán felülről lefelé, a feladatból a részletek felé tervezünk és fordítva hozzuk létre a kész programot, vagyis alulról felfelé építkezünk. A program megírása során háromféle elemet használunk, ezek [13]:

- szekvencia, vagyis műveleteket hajtunk végre, eljárásokat hívunk, értékeket adunk;
- szelekció, vagyis különböző feltételeknek megfelelően elágazásokat hozunk létre;
- iteráció, ciklusokat használunk.

A klasszikus strukturált programozás tökéletesen alkalmas algoritmusok tiszta és világos leírására. Viszont korlátozottan alkalmas igen összetett műveletek elvégzésére.

Az 1960-as évek közepén az AT&T és a Bell Laboratórium közreműködésével egy MULTICS<sup>1</sup> nevű operációs rendszert fejlesztettek. Ebből a fejlesztői csapatból vált ki Ken Thompson, aki 1969 szeptemberére kifejlesztette a UNICS<sup>2</sup> nevű operációs rendszert. Ez természetesen assembly nyelven íródott [13].

Az operációs rendszer annyira jól sikerült, hogy az eredeti PDP-7-es számítógép mellett más számítógépekre is implementálták. Természetesen assembly nyelvet használva ez igen nehéz volt [13].

Ennek következménye az lett, hogy egy magas szintű programozási nyelvet próbáltak keresni a hordozhatóság biztosítására, de nem találtak. Ha nem találtak, akkor készítettek egyet, ez volt a C programozási nyelv, amely Ken Thompson mellett Dennis Ritchie nevéhez is fűződik [13].

A C egy klasszikus moduláris programozási nyelv. A moduláris nyelvek a strukturált programozás minden tulajdonságával rendelkeznek, de bevezették a modulokat. A modulok önálló forrásállományok. Logikailag a modulok egy adott feladatot látnak el, de ez a gyakorlatban nem mindig teljesül.

A modulok lehetővé teszik, a kód- és adatrejtést. Továbbá lehetővé teszik a kód újrafelhasználását és a részenkénti (modulonkénti vagy modulcsoportonkénti) tesztelésének lehetőségét, ami igen hatékonyá teszi a fejlesztési folyamatot.

Ez a technológiai lépés nagy előnyökkel járt a klasszikus strukturált programozási módszertannal szemben. Az egyik ilyen előny, hogy több fejlesztő dolgozhat egy projekten. Csak gondoljuk meg azt a tény, hogy egy Linux kernel több millió kódsorból áll.

Az 1960-es évek közepén felmerült az objektumorientált programozás ötlete. Ezt először Simula nevű programozási nyelven alkalmazták az 1960-as években. A következő lépés a Smalltalk programozási nyelv volt, amelyet a Xerox PARC kutatóintézet fejlesztett

<sup>1</sup> Multiplexed Operating and Computing System.

<sup>2</sup> Uniplexed Operating and Computing System.

ki az 1970-es évek közepén. Az igazi áttörés az 1980-as időszakban történt meg, amikor olyan nyelvek jelentek meg, mint a C++ és az Object Pascal. A későbbi OOP nyelvek tipikus képviselői a Java és a C# [2].

Az objektumorientált nyelvek három újabb tulajdonsággal bővítették a lehetőségeket, ezek [2]:

- öröklődés, ahol a tulajdonságok és szolgáltatások (metódusok) öröklődhetnek;
- egységbezárás, ahol az összetartozó adatok és metódusok egymáshoz vannak rendelve;
- polimorfizmus (más néven többalakúság) ahol a metódusokat statikusan vagy dinamikusán újra tudjuk definiálni.

Az objektumorientált módszertan nagyban növeli az absztrakció szintjét. Erre a megjegyzésre még visszatérünk.

Minden egymást követő módszertan magában foglalja az előző módszertan tulajdonságait, csak ezeket célszerű módon bővíti, esetleg korlátozza.

Ebben a cikkben csak olyan programozási nyelvekkel foglalkozunk, amelyek az úgynevezett imperatív programozási paradigmát követik [12].

Az imperatív programozás alapvető jellemzői a következők:

- állapotalapú programozás: a változók értékei a program futása során változhatnak. Az utasítások arra irányulnak, hogy változtassák meg ezeket az értékeket;
- változók: az állapotok leírását a változók biztosítják;
- utasítások: az imperatív nyelvek kifejezetten utasításokat használnak a végrehajtandó lépések leírására. Például az értékadás, a ciklusok, az elágazások és más vezérlési szerkezetek közvetlenül az állapotot módosítják;
- procedurális programozás: az imperatív paradigma gyakran egybefonódik a procedurális programozással, ahol a programok eljárásokból (eljárásokból, függvényekből) épülnek fel, és ezek egymásba ágyazhatók.

Az utasítások sorrendje fontos, azokat általában az adott sorrendben kell végrehajtani. Ezt nevezzük szekvenciának.

*Megjegyzés:* a másik paradigma a funkcionális programozás. A funkcionális programozás és működésbiztos szoftverek kérdését egy következő cikkben részletezzük.

## 2. A feladat és a módszertan kapcsolata

Kezdjük ezt a fejezetet a következő kijelentéssel:

Biztonságkritikus szoftver fejlesztésében nincs szükség sem „igazi programozóra”, sem divatra.

A biztonságkritikus fogalom esetünkben a működésbiztonságot takarja. Itt a hatékonyság, az áttekinthetőség, a megbízhatóság és a tesztelhetőség a legfontosabb. Hiába szép egy olyan algoritmus, amely tele van trükkökkel, rekurziókkal, önátíró kódokkal vagy többszörös erőltetett öröklődéssel, indokolatlan polimorfizmussal és végtelenségig fokozott absztrakciókkal, de nem teljesít valamilyen előírást.

A divat veszélye. Saját emlékem, amikor 1992 végén megkerestek egy viszonylag egyszerű felügyeleti szoftver megírásának feladatával. A program hardvereszközt is kezelt volna. A feladat kiválóan alkalmas volt DOS 3.22 operációs rendszerre minden szempontból. A megrendelő ragaszkodott a Windows 3.1-hez, mert idézem: „Az korszerű...”. A Windows 3.1-et 1992. április 6-án bocsátották ki, megbízhatósága katasztrofális volt, és nagyon gyengén volt dokumentálva. A real-time követelményekről inkább ne beszéljünk.

Ezt a trendet napjainkban is tapasztaljuk, természetesen nem a DOS 3.22, Windows 3.1 kontextusában, inkább az alkalmazott módszertanok szempontjából.

Emlékezzünk arra, amikor Bjarne Stroustrup 1980-ra kifejlesztette a C++ programozási nyelvet, szinte minden rendszert C++-ban, objektumorientáltan fejlesztettek. Ennek az lett a következménye, hogy nagy és lassú rendszerek készültek. Vizsgálataink alapján ezeknek a rendszereknek a 75%-ánál nem volt indokolt az objektumorientált fejlesztés [8].

A cikk e pontján ha valaki azt érzi, hogy az objektumorientált fejlesztésnek ellensége lennék, az téved. Ez a cikk további részében ki fog derülni.

A kérdés továbbra is az, hogy mit, hol és miért.

## 2.1. A moduláris fejlesztés javasolt alkalmazási területei

Irányítási kérdésekben számos esetben előfordul, hogy az adott irányító berendezés egy, vagy néhány egymástól különböző feladatot lát el. Ez az a tipikus eset, amikor az objektumorientált fejlesztés nem indokolt.

Az adott feladatokat egyenként különböző programrészeket valósítják meg. Ezek az egységek külön-külön megírhatók, tesztelhetők és igény szerint újra felhasználhatók. Nem indokolt a magas absztrakciós szint, sokkal inkább a megbízható, gyors, megjósolható működés.

*Megjegyzés:* a programrészetet a szakmai zsargonban unit-nak nevezik. Ez lehet egyetlen függvény, egy modul vagy több hierarchikusan egymásra épülő modul. Lényeges, hogy ez a programrészlet egy adott feladatot vagy feladatcsoportot kezel.

Vegyük példának egy repülőgép oldalkormány-vezérlését. A példa terjedelmi okokból nem teljes, számos biztonsági megoldást és egyéb információs kapcsolatot nem részletezünk [4], [8].

Feladatok:

- a pedálok pozíciójának lekérdezése;
- az oldalkormány sebességtől függő kitérítése;
- csillapításvezérlés;
- erő-visszacsatolás a pedálokra.

Ez most egyetlen ECU<sup>3</sup>-ra van bízva. Kerülendő a kritikát, tisztában vagyok azzal, hogy ebben az esetben hardverredundanciára lenne szükség (A320 esetén ELAC1, ELAC2, FAC1, FAC2) [3], [4].

A feltételezett ECU szoftvere egy monolitikus, úgynevezett kis real-time operációs rendszeren futó szoftver.

A feladatok:

- pedálok pozíciójának lekérdezése;

<sup>3</sup> Electronic Control Unit.

- bemeneti jelek:
  - pedálpozíció;
- pedálerőmérés;
  - kimeneti jelek:
    - pedálkitérítés értéke;
- az oldalkormány kitérítése:
  - bemeneti jelek:
    - sebességjel a repülésvezérlő számítógéptől;
    - pedálpozíció-modul kimeneti jele;
    - oldalkormány-pozíció jele;
  - kimeneti jelek:
    - oldalkormány hidraulikus hajtás kimeneti jele;
  - feladatok:
    - a sebességjel alapján a kormánykitérítés számítása;
    - a kormánykitérítés szabályozása;
- csillapításvezérlés:
  - bemeneti jelek:
    - pedálpozíció-modul kimeneti jele;
    - függőleges tengely körüli gyorsulás jele;
    - sebességjel;
    - tömeg és súlyponti adatok;
  - kimeneti jel:
    - oldalkormány-kitérítés módosító jele;
  - feladat:
    - a repülőgép dinamikai modellje és a bemeneti jelek alapján a legyezőmozgás csillapítása;
- erő-visszacsatolás a pedálokra:
  - bemeneti jel:
    - sebesség jel;
  - kimeneti jel:
    - terhelés mértéke;
  - feladat:
    - a pedálterhelés beállítása a sebesség függvényében.

Látható, hogy a feladatok egyediek. Az is látható, hogy a feladatokat megvalósító programrészek egymás között elég összetett módon kommunikálnak. A kommunikációt az alkalmazott real-time operációs rendszer biztosítja [5].

Vegyük kicsit részletesebben a csillapításvezérlés feladatát.

A repülőgép és a repülési adatok alapján az adott programrészletnek meg kell oldania a kérdéses leíró differenciaegyenleteket és a bemeneti jelek függvényében a legyező irányú lengő mozgás csillapítását.

Ez egy elég összetett numerikus eljárásrendszer, amelyet nyilvánvalóan rendkívül alaposan kell megtervezni és tesztelni. A feladatok jól elkülöníthetők és egyediek, ezért az objektum-orientált megoldás nem indokolt.

A fejlesztés egymástól függetlenül történhet, természetesen egy előre lefektetett specifikáció alapján. A statikus tesztelés viszonylag egyszerű, mert az absztrakciós szint alacsony. A dinamikus tesztelés programegységenként szimulált környezetben részletenként elvégezhető. Így a rendszerintegrációs fázisra, amikor a programegységeket egy funkcionális egységgé alakítjuk, a programegységek megbízhatósági szintje magas.

## 2.2. Az objektumorientált fejlesztés javasolt területei

Az objektumorientált módszertan használata a következő biztonságkritikus területeken indokolt:

- ha több, közel hasonló fizikai objektumot kell kezelünk úgy, hogy ezeknek a program szempontjából saját belső állapotaik vannak (egységbezáras);
- ha több olyan feladatot kell ellátni, amelyek esetén számos közös tulajdonság és eljárás van, de ezeket bizonyos esetekben bővíteni kell (öröklődés);
- ha több olyan feladatot kell ellátni, amelyek esetén számos közös tulajdonság és eljárás van hasonlóan az előző ponthoz, de ezek közül egyet vagy többet bizonyos esetekben módosítani kell (öröklődés és polimorfizmus);
- ha a kérdéses szituáció egyes objektumokat „hoz létre” vagy tüntet el.

Hely hiányában csak a 2. és 4. pontra mutatunk be mintapéldát, ez a TCAS-rendszer kijelző-kezelése. Hasonlóan az előzőekben bemutatott példához ezt is leegyszerűsítettük.

A TCAS<sup>4</sup> olyan eszköz, amely általában a navigációs képernyőn (ND)<sup>5</sup> figyelmezteti a pilótát, ha egy másik repülőgép túl közel került. Ha ez a közelség eléri azt a mértéket, hogy kitérő manőverre van szükség, akkor a másik gép fedélzetén levő hasonló berendezéssel rádiójelekkel egyeztetni a helyzetet, és mindkét pilótának javaslatot tesz arra a kitérő manőverre, amely biztosítja az ütközés elkerülését. A manővert a pilóták hajtják végre előírások szerint és esetleg a légi forgalmi irányító utasítása szerint [14].



1. ábra  
A TCAS-képernyő [6]

<sup>4</sup> Traffic Collision Avoidance System.

<sup>5</sup> Navigation Display.

Az 1. ábrán látható, hogy a TCAS kijelzése a hatókörön belül szimbólumokkal, színekkel és numerikus értékekkel ábrázolja a repülőgép körüli légi járművek helyzetét és státuszát.

Az egyszerűsített modellben minden egyes szimbólum közös tulajdonsága a képernyőn lévő pozíciója, amelyet minden egyes szimbólumra azonos módon számítunk ki. Eltérő tulajdonságok a szimbólum alakja, színe, az emelkedés és süllyedés irányának kijelzése és a magasságkülönbség numerikus értéke és ennek színe.

A légi forgalmi szituáció az idő és a repülőgépek függvényében változik. Egyes gépek belépnek a rendszer hatókörébe, egyes gépek elhagyják azt.

Ezt a helyzetet objektumorientáltan az úgynevezett dinamikus objektumokkal lényegesen egyszerűbben lehet kezelni, mint moduláris esetben.

*Megjegyzés:* a dinamikus objektumok kezelése biztonságkritikus esetekben nem célszerű, illetőleg magasabb biztonsági (SIL)<sup>6</sup> szinteken nem is engedélyezett. Ez az eset egy kijelzés, amelyet szóbeli utasítás is követ. A TCAS csak a pilótákon keresztül gyakorol hatást a légi jármű viselkedésére. Ezek a plusz információk megfelelő redundanciának számítanak, így a dinamikus objektumok használata megengedett.

A képernyőn kijelzendő TCAS-szimbólumok [8]:



Saját repülőgép. Gyakran más szimbólumot használnak. Színe lehet fehér, türkiz és sárga. A képernyőn nem változik.



Ismeretlen forgalom. Magassága és függőleges sebessége ismeretlen. Színe fehér vagy türkiz. A későbbiekben változhat a pozíciója és típusa.



Közeleli forgalom. Nincs sem TA<sup>7</sup>, sem RA<sup>8</sup> tartományban, lásd 1. ábra. Színe fehér vagy türkiz. A későbbiekben változhat a pozíciója és típusa. Jelenleg 1100 lábbal magasabban van, és süllyed.



Figyelmet igénylő forgalom. TA-tartományban van, de csak figyelmeztet. Színe sárga, formája kör. A későbbiekben változhat a pozíciója és típusa. Jelenleg 900 lábbal alattunk van, és szintben repül.



Veszélyes forgalom. RA-tartományban van, ekkor már a TCAS-utasításokat ad a pilótáknak. Színe piros, formája négyzet. A későbbiekben változhat a pozíciója és típusa. Jelenleg 500 lábbal alattunk van, és emelkedik.

A jobb megértés érdekében rövid összefoglalót adunk a TA- és RA-tartományokról.

TA-tartomány: potenciális ütközésveszély esetén hangjelzést ad ki. Ez a rendszer minden „behatoló” repülőgépről figyelmezteti a pilótát „traffic, traffic” hangos bejelentéssel. Nem ad semmilyen javaslatot elkerülési manőverre [6], [10].

<sup>6</sup> Safety Integration Level.

<sup>7</sup> Traffic Advisory.

<sup>8</sup> Resolution Advisory.

RA-tartomány: a konfliktushelyzet súlyosabbá válik a TA-riasztást követően, és konkrét ütközésveszély áll fenn, szöveges utasítást és vizuális figyelmeztetést generál. Ez a riasztás jelzi az érintett repülőgépet, és a pilóta által azonnal végrehajtandó elkerülő műveletet javasol [9].

A rendszer úgy van kialakítva, hogy a másik repülőgép TCAS-rendszere ellentétes jellegű műveletet javasol [10].

Amint a veszélyes helyzet megszűnik, a rendszer „Clear Conflict” üzenetet küld [10].

Térjünk vissza a szoftverfejlesztés kérdéséhez. A saját repülőgép szimbólum a TCAS bekapcsolásával kirajzolódik a képernyőre, és egészen addig ott marad, amíg a TCAS-rendszer vagy a TCAS-kijelzést ki nem kapcsolják. Ezzel így nem foglalkozunk tovább.

A további objektumok közös tulajdonsága, hogy van nekik a képernyőn vízszintes és függőleges koordinátájuk. Ezeket célszerű egy úgynevezett ős osztályba deklarálni.

Adott továbbá négy alapvető képernyőszimbólumunk, amelyek mindegyikét egy-egy önálló osztályba definiálják.

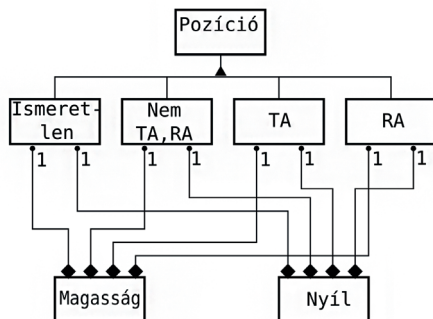
Ezekhez a kijelzésekhez tartozik a magassági információ és a függőleges mozgás szimbóluma. Ezeket szintén érdemes egy-egy osztályba definiálni.

*Megjegyzés:* a fenti bekezdésekben többször használtuk az osztály kifejezést. Az osztály egy objektumcsoport formális leírása [8].

Az objektum az osztály fizikai megvalósítása. Ez már működő kódokat és változó területeket tartalmaz [8].

A képernyőszimbólumok objektumai a magassági információt és a függőleges mozgást kijelző objektumait tartalmazza. Ez azt jelenti, hogy amikor egy képernyőszimbólum objektuma létrejön, ezek az objektumok is létrejönnek [7].

Az UML-diagram a 2. ábrán látható.



2. ábra

A TCAS-kijelzés UML-diagramja [6]

A következő probléma, hogy a tervezésnél nem tudhatjuk, hogy egy kérdéses helyzetben hány darab objektumot kell elhelyezni a képernyőn. Ez azt feltételezi, hogy a szimbólumokat dinamikus módon kell létrehozni.

Tehát, ha egy légi jármű a TCAS hatókörébe kerül, akkor az ennek megfelelő szimbólumnak meg kell jelennie a képernyőn, és ezt kezelnünk is kell. Természetesen, ha kikerül a megfigyelési tartományból, akkor a szimbólumnak el kell tűnnie a képernyőről és a memóriából.

Továbbá, ha az adott légi jármű státusza változik, például közeli állapotból belép TA-állapotba, akkor a kijelzésnek változnia kell. Erre az egyik megoldás, hogy a dinamikus közeli objektumot megszüntetjük, de azonnal létrehozuk a TA-típusú objektumot.

Ez számos feladatot jelent a fejlesztő számára, ami bizonyos szempontból kockázatos lehet. Természetesen ez a leegyszerűsített példa egy gyakorlott programozónak egyszerű feladat.

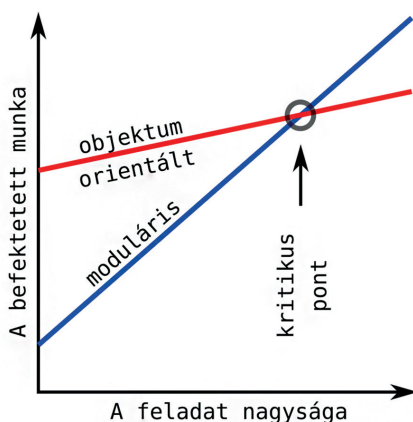
### 2.3. Egyéb szempontok

Tapasztalt tervezőként, programozóként, tesztelőként és auditorként az a tapasztalatom, hogy a két tárgyalt módszertan alkalmazása között jelentős különbség van a befektetett munka mennyisége és a feladat mérete között (lásd 3. ábra).

A diagram alapján láthatjuk, hogy egy feladat megoldásánál a feladat méretétől függően az elvégzett munka mennyisége változó.

Általánosan kijelenthetjük, hogy a moduláris módszertannál viszonylag kevés előkészítő munka után már van értékelhető eredmény. Ez tesztelési szempontból nagyon kedvező. Azonban ahogy nő a feladat, meredeken nő a befektetett munka.

Objektumorientált módszertan esetén kezdetben nagyon sok munkát kell elvégezni, de a feladat növekedésével a befektetett munka jóval laposabb függvényt eredményez.



3. ábra

A moduláris és az objektumorientált módszertanok munkadiagramja [6]

A 3. ábrán látható kritikus pont helyzetét sajnos egzakt módon nem tudjuk megadni, ezt mindig az adott probléma határozza meg.

Ha a két bemutatott példát vizsgáljuk, az oldalkormány-vezérlés esetén indokolatlan lenne az objektumorientált megoldás, mert minden feladatból csak egy darab van. A TCAS-kijelzésnél előre nem tudjuk, hány szimbólumot kell kezelünk, lehet, egyetlenegy sem, de lehet, hogy 30 darabot. Ez megoldható modulárisan, de nagyon nehézkes, míg objektumorientáltan viszonylag egyszerű.



### 3. Összefoglalás

A két módszertan egymás mellett létezik. Mindkettőnek megvan a maga szerepe. Nagyon fontos, hogy a tervezés folyamán figyelembe vegyük a felhasználás módját, de ne feledkezzünk el a fejlesztési és tesztelési szempontokról sem.

Tapasztalati tény, hogy az objektumorientált fordítóprogramok által előállított kódok nagyobbak és lassabban futnak, mint a „hagyományos” fordítóprogramok kimeneti kódjai. Ez szintén szempont lehet a tervezésnél, de manapság már inkább a kifogás tartományába eső probléma, hiszen a hardverek a megfelelő szempontok figyelembevételével széles skálán rendelkezésre állnak mind memóriakapacitás, mind futási sebesség tekintetében.

Erre szokták azt mondani: „Na de az ár!” Igazából nincs jelentős különbség, sőt néha a nagyobb teljesítményű eszköz az olcsóbb.

Azt is meg kell jegyeznünk, hogy számos objektumorientált nyelv, mint például a C++, vagy az ADA [1] lehetővé teszi, hogy modulárisan, objektumokon kívül programozhassunk. Viszont a C++ fordító összehasonlítva a C fordítóval még akkor is sokkal szigorúbb a programozóval szemben, ha a C összes szigorító kapcsolóját bekapcsoljuk [7].

Ezt a MISRA-ajánlás is megemlíti [9].

### Felhasznált irodalom

- [1] Adacore, *Introduction to Ada*. [é. n.]. Online: <https://learn.adacore.com/courses/intro-to-ada/chapters/introduction.html>
- [2] Adacore, *Object-oriented programming*. [é. n.]. Online: [https://learn.adacore.com/courses/intro-to-ada/chapters/object\\_oriented\\_programming.html](https://learn.adacore.com/courses/intro-to-ada/chapters/object_oriented_programming.html)
- [3] Airbus Training Flight Crew Training Manual, FLIGHT CONTROLS. Online: [www.smart-cockpit.com/docs/A320-Flight\\_Controls.pdf](http://www.smart-cockpit.com/docs/A320-Flight_Controls.pdf)
- [4] AviationHunt Team, „ATA 27: Airbus A320 (Technical Notes),” *Aviationhunt.com*, 2024. március 12. Online: [www.aviationhunt.com/airbus-a320-ata-27/#google\\_vignette](http://www.aviationhunt.com/airbus-a320-ata-27/#google_vignette)
- [5] D. Briere, C. Favre, P. Traverse, „Electrical Flight Controls, From Airbus A320/330/340 to Future Military Transport Aircraft: A Family of Fault-Tolerant Systems,” in *The Avionics Handbook*, C. Spitzer szerk., Boca Raton, CRC Press LLC, 2001. Online: [http://helitavia.com/avionics/TheAvionicsHandbook\\_Cap\\_12.pdf](http://helitavia.com/avionics/TheAvionicsHandbook_Cap_12.pdf)
- [6] IVAO Documentation Library, *Traffic Collision Avoidance System – TCAS*. [é. n.]. Online: [https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Traffic\\_collision\\_avoidance\\_system-TCAS](https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Traffic_collision_avoidance_system-TCAS)
- [7] L. Erdődi, A. Jøsang, „Exploitation vs. Prevention: The Ongoing Saga of Software Vulnerabilities,” *Acta Polytechnica Hungarica*, 17. évf. 7. sz. pp. 199–218. 2020. Online: <https://doi.org/10.12700/APH.17.7.2020.7.11>
- [8] M. Olsson, *C++20 Quick Syntax Reference A Pocket Guide to the Language, APIs, and Library*. Fourth Edition, New York, Apress, 2020. Online: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5995-5>
- [9] S. Misra, „Evaluation Criteria for Object-oriented Metrics,” *Acta Polytechnica Hungarica*, 8. évf. 5. sz. 2011. pp. 109–136. Online: [http://acta.uni-obuda.hu/Misra\\_31.pdf](http://acta.uni-obuda.hu/Misra_31.pdf)
- [10] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, *Advisory Circular*. 2014. Online: [www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory\\_circular/ac\\_20-151b.pdf](http://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_20-151b.pdf)

- [11] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, *Introduction to TCAS II Version 7.1*. 2011. Online: [www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory\\_circular/tcas%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf](http://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/tcas%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf)
- [12] Wikipedia, *ENIAC*. [é. n.]. Online: <https://hu.wikipedia.org/wiki/ENIAC>
- [13] Wikipedia, *Procedural Programming*. [é. n.]. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural\\_programming](https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_programming)
- [14] Wikipedia, *Structured Programming*. [é. n.]. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Structured\\_programming](https://en.wikipedia.org/wiki/Structured_programming)
- [15] Wikipedia, *Traffic Collision Avoidance System*. [é. n.]. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic\\_collision\\_avoidance\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_collision_avoidance_system)
- [16] Meleg Á. G., *Az igazi programozó*. 2015. október 17. Online: [www.scribd.com/doc/285592411/Az-Igazi-Programozo](http://www.scribd.com/doc/285592411/Az-Igazi-Programozo)

---

## Methodologies Used in Safety-Critical Development

*Ever since we use computers to perform control engineering tasks, our goal has been to ensure that their operational safety meets the desired standards, both from a hardware and software perspective. We can easily see that above a level that is difficult to define that the complexity of the software is so high that it is impossible to see and follow it and, as we wrote in several previous articles, to test it sufficiently. In this paper, after a brief historical summary, we will deal with the development methodologies used today, highlight their appropriate field of application and their main characteristics. We present examples of where and how each discussed methodology can be applied in aviation.*

**Keywords:** operational security, software development

---

Dr. Schuster György  
tanszékvezető, egyetemi docens  
Óbudai Egyetem  
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar  
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek  
Intézet  
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék  
[schuster.gyorgy@uni-obuda.hu](mailto:schuster.gyorgy@uni-obuda.hu)  
[orcid.org/0000-0002-8573-3670](https://orcid.org/0000-0002-8573-3670)

---

György Schuster, PhD  
Head of Department, Associate Professor  
Óbuda University Kandó Kálmán  
Faculty of Electrical Engineering  
Institute of Electronic and Communication  
Systems  
Department of Instrumentation and  
Automation  
[schuster.gyorgy@uni-obuda.hu](mailto:schuster.gyorgy@uni-obuda.hu)  
[orcid.org/0000-0002-8573-3670](https://orcid.org/0000-0002-8573-3670)

---



Halmi Lajos

## Az emberi tényező szerepének vizsgálata korszerű diagnosztikai és információtechnológiai eszközök alkalmazásával – különös tekintettel az orvosbiológiai monitorozás területére a repülésbiztonság aspektusából

*A hosszú ideje tartó, folyamatos növekedési ütemével a légi közlekedés meghatározó szektorrá vált a közlekedési ágazatokon belül. Emellett a légtér napjainkra meghatározó gazdasági erőforrássá nőtte ki magát, úgy, hogy eddig szinte csak hagyományos (pilótás) repülési feladatokkal volt ellátva. Ez már most jelentős terhelést jelent a területen dolgozó szakemberek számára, főleg a repülő-hajózó állományra. Ezért kiemelten fontos releváns információval rendelkezni a pilóták élettani státuszáról, illetve biztosítani az állapotmonitorozás műszaki és repülőorvosi feltételeit. Az orvosi kockázatok felismerése és a kezelésükre tett javaslatok igen fontos tényezők az általános repülésbiztonság fenntartásában, ezért a kutatásoknak ezen a területen mind repülésbiztonsági, mind műszaki-technikai szempontból kiemelt szerepük van. Az új technológia és tesztelési módszerek bevezetése és azok alkalmazása további, részletekbe menő, tudományos eredményekkel igazolt kutatásokat igényel. Ezek a változások számos kihívás mellett rengeteg lehetőséget is magukban rejtnek, amelyek feltérképezése és tudományos igényű vizsgálata katonai és nemzetvédelmi érdekeket szolgál, mivel nagymértékben hozzájárulhatnak a honvédelem által meghatározott célkitűzések eléréséhez, és ezen keresztül a béke- és békétől eltérő időszakokban szükséges információs uralomhoz, valamint vezetési fölényhez.*

**Kulcsszavak:** emberi tényező, repülési eljárások, CRM<sup>1</sup>, diagnosztika, információtechnológia, kockázatelemzés, repülésbiztonság

### 1. Bevezetés

A repülés napjainkra általánossá és konstans tényezővé vált mind a polgári, mind a katonai szegmensben, amiből fakadóan jelentős hatást gyakorol a gazdasági, kereskedelmi, politikai, katonai és más egyéb kiemelkedő területek egészére. Ezek az impulzusok komplexek és számottevő hatásuk van. A repülések megnövekedett száma szükségszerűen eredményezi a hibalehetőségek előfordulásának növekedését is. A jelenlegi repüléseket kiszolgáló repülőeszközök magasabb szintű technológiai hátteret és kiemelkedő automatizálási és elektronikai platformot képviselnek.

<sup>1</sup> Crew Resource Management.

Az említett tényezők tükrében számottevő figyelmet kell fordítani az emberi tényező szerepének megkerülhetetlen kérdésére a levegőben és a földön egyaránt. Vizsgálni kell a repülésbiztonság területére gyakorolt hatásait, azonfelül tudományos feltárás céljából elengedhetetlen azokat értelmezni, illetve rendszerezni. A hagyományos légi közlekedésben a közelmúltig nem alkalmazták a korszerű technológia által kínált lehetőségeket, noha ennek a területnek a bevonásával nagymértékben növelhető az emberi tevékenység által generált információk megismerése és feldolgozása. A repülési eljárások biztonságának szavatolása kulcsfontosságú, annak az optimális integrálása és alkalmazása mindannyiunk alapvető érdeke.

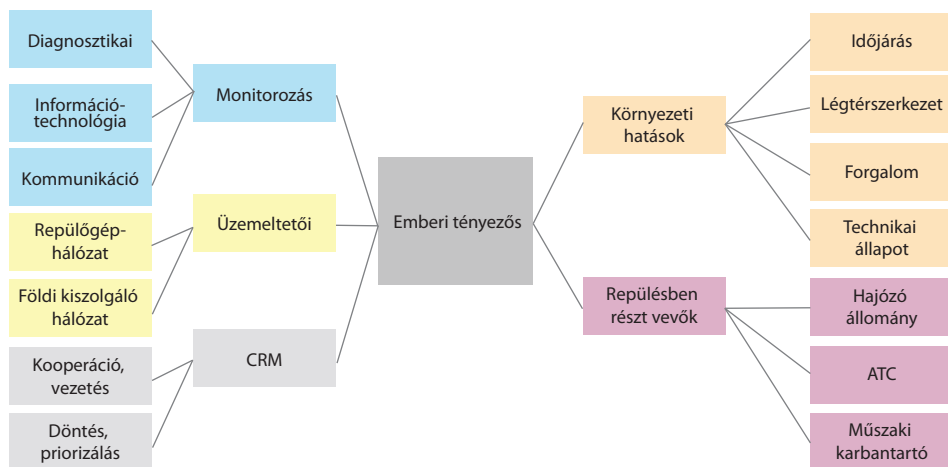
Jelenlegi környezetünkben a polgári és a katonai területen egyaránt felértékelődött a kapcsolódó eljárások fejlesztésének szükségessége, amelyek lényegi változásokat képesek eredményezni. Mindkét terület képviselőinek érdekeit szolgálja a meglévő protokollok fejlesztése, amelyen keresztül megvalósulhat egy magasabb repülésbiztonsági szint.

A kutatás célja, hogy feltérképezze, beazonosítsa és megvizsgálja azokat az innovatív technológiai megoldásokat és adekvát protokollokat, amelyek közvetlen hatást gyakorolnak a katonai és polgári légi forgalom, illetve a humán faktor jövőjére a repülésbiztonság aspektusából. Mindeközben elemezi azok információtechnológiával összefüggő interdiszciplináris aspektusait reális és virtuális környezetben egyaránt, válaszolva az alábbi főbb kérdésekre:

1. Milyen elvek és tapasztalatok mentén lehet determinálni az emberi tényező szerepét a légi közlekedés egészében?
2. Hogyan befolyásolják a humán faktorial összefüggő kockázati tényezők a légi közlekedés egészét a repülésbiztonság nézőpontjából?
3. Melyek azok a diagnosztikai és korszerű információtechnológiai megoldások, amelyek az érvényben lévő humán faktorial kapcsolatos procedúrákat meghaladó módon garantálhatják a katonai és polgári repülés biztonságát?

Az imént megfogalmazott kérdések megválaszolásával a kutatás hozzájárulhat a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program eredményeihez, a Magyar Honvédség, illetve a polgári légi közlekedés folytonosan bővülő és változó közegéhez. Fontos hangsúlyozni, hogy a korszerű információtechnológiai struktúrák, valamint a mesterséges intelligencia eszközeivel támogatott komponensek elterjedése a légi közlekedésben jelentős értéket adhat az emberi tényező kérdéseihez köthető adatok információfeldolgozásának javításához, ennek azonban szükséges előfeltétele a jelenlegi légiközlekedés-biztonsági kutatások ismerete. Az előre jósolható fordulatok számos lehetőséget rejtenek magukban, amelyek tanulmányozása és vizsgálata repülésbiztonsági érdekeket szolgál. Megemlítik, hogy a légi közlekedés magasan fejlett technológiát használ, amelyben folyamatosan új rendszerek, forradalmian új eszközök jelennek meg. E csúcstechnológia megalkotása és üzemeltetése rendkívüli tudást, szervezést és magasan képzett szakemberek szorosan összehangolt munkáját igényli [1].

A problémafelvetéseimet és egyben kutatási területem részegységeinek (vizsgálatom tárgyának és egyben témájának) bemutatását az 1. ábrán látható fogalomtérképpel kívánom szemléltetni. Ezen az emberi tényezőt befolyásoló, széles spektrumú és többtényezős struktúrát illusztrálom, amely fokozatosan bontakozik ki. A bemutatás szakaszos, ahol az átfogóbb területek irányából halad a specifikusabb fogalmak felé. A terület komplexitása és vizsgálatának szükségessége szemléletes formában rajzolódik ki a kép nyújtotta információk segítségével.



1. ábra  
Fogalomtérkép [a szerző]

## 2. Az emberi tényező szerepe a légi közlekedésben

Az emberi tényező kulcsfontosságú szerepet játszik a repülőgépek biztonságos üzemeltetésében. Magában foglalja a pilóták, a repülőgépkezelő-személyzet, ATC<sup>2</sup>, műszaki személyzet és más repülési személyzet cselekedeteit, döntéseit és állapotát. A repülési tevékenységek során az emberi tényező lehetőséget ad a hibákra, amelyek negatív hatással lehetnek a repülés biztonságára [2]:

- kommunikáció hiánya;
- elbizakodottság;
- tudás hiánya;
- figyelem elterelődése;
- csapatmunka hiánya;
- kifáradás;
- erőforráshiány;
- időbeli nyomás;
- asszertivitás hiánya;
- stressz;
- helyzettudatosság hiánya;
- normák.

Az emberi hiba vizsgálatához három különböző megközelítési módszer létezik: okként, eseményként és következményként tekinthetünk ezekre, s ennek segítségével mutatják be a hiba különböző aspektusait. Az első megközelítés szerint a hiba egy ok lehet. Ebben az esetben a hangsúly az olyan tetteken van, amelynek valamilyen légi közlekedési esemény lesz

<sup>2</sup> Air Traffic Control.

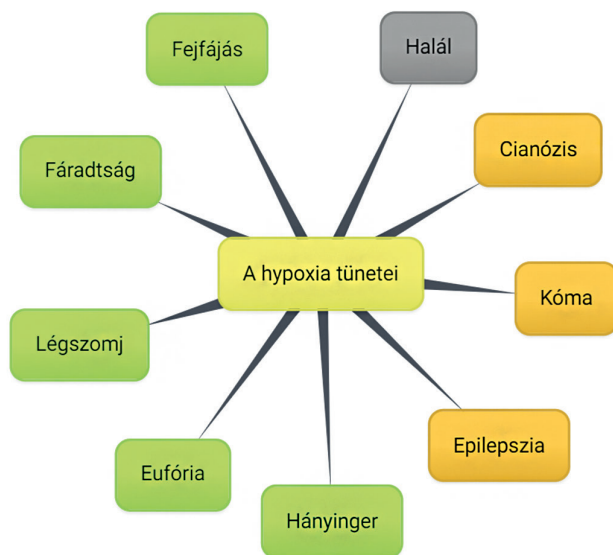
a következménye. A második megközelítés azt hangsúlyozza, hogy a hiba egy értelmezhető esemény. Ebben az esetben a hibafelfogás az emberi cselekedetre összpontosít, függetlenül attól, hogy a hiba okoz-e káros következményt. A hibát felismert jelenséggént kezelik, mivel a hiba észlelése megtörtént. Például egy ellenőrzőlistában elhagyott lépés nem feltétlenül vezet azonnali problémákhoz, de az elkövető mégis hibaként értékeli azt. A harmadik megközelítés szerint a hiba következményként is értelmezhető. Itt az emberi hiba és a káros következmény közötti összefüggést hangsúlyozzuk, vagyis a kettő között egyenes ok-okozati kapcsolatot feltételezünk [3]. Ez a megközelítés gyakorlatilag összekapcsolja a hibás cselekedetet a következménnyel. Másik megközelítés szerint az emberi hiba lehet láthatatlan, de mégis közvetlenül okozhat káros következményeket. Ezek a rejtett hibák a rendszerben húzódnak meg, gyakran jelen vannak, és bár nem mindig válnak láthatóvá, mégis rejtett módon káros hatásokat fejtenek ki. Mégis a legkedveltebb modell talán a Reason-modell, amely tárgyalja, hogy a humán hibák gyökereit a repülésben részt vevő szervezetek működésében kell keresnünk [4]. Ennek a megközelítésnek a középpontjában az áll, hogy a hibák lépésről lépésre kibontakozó okait kell felderítenünk, olyan mélyen rejtőző kapcsolatokat kutatva, amelyek fokozatosan vezetnek a hiba kialakulásához. Rávilágít arra, hogy vannak olyan rejtett tényezők, amelyek a szervezeti kultúrába és a szabályrendszerbe beépítve előkészítik az emberi hibákat. Ebben a modellben a hiba szerepe kulcsfontosságú, ellentétben más megközelítésekkel, amelyek szerint maga a hiba az ok, és az emberi szerepet kell automatizálással csökkenteni, miközben a rendszert védi. Azonban Reason elképzelése szerint jobb elfogadni, hogy a légi közlekedés rendszere alapvetően kockázatokat hordoz és alapvetően nem biztonságos. Az emberi hiba nem a rendszer véletlenszerű rossz működésének következménye, hanem a rendszerben meglévő rejtett körülmények eredménye.

### 3. A humán faktorral összefüggő kockázati tényezők befolyása a repülésbiztonság nézőpontjából

A repülés mint háromdimenziós dinamikus helyzetváltoztatási képesség olyan komplex kihívást jelent az emberi fizikai és szellemi képességek számára, amely az élettani és pszichés területeket is érinti. Ezek a kihívások a repülés dinamikájában és intenzitásában messze meghaladják az emberi evolúció során kifejlődött, a faj szintjén jelentkező fiziológiai reakciók és agyi keringés reflexeinek adaptív válaszkészségét. Az új kabintervezési megoldások és a technikai rendszerek redundanciája, ideértve a mesterséges intelligencia öntanuló képességeit is, minimalizálja a pillanatnyi technikai hiányosságok okozta veszélyhelyzeteket. Az emberi faktor azonban továbbra is a repülésbiztonság gyenge pontja marad a „ember–gép–környezet” dinamikus rendszerében. A pilóta emberi tényezője a leginkább kiszámíthatatlan komponens a repülésbiztonság terén. Ez a tényező nem csupán a repülésbiztonsági kérdéseket érinti, hanem a harci készséget és a hadrafoghatóságot is befolyásolhatja azáltal, hogy korlátozó tényezővé válhat a modern harci technika irányításában, kezelésében és a katonai feladatok végrehajtásában [5]. Az egyik legalapvetőbb és egyben legfenyegetőbb veszély a hypoxia.<sup>3</sup> Akkor beszélünk erről a kóros állapotról, ha a vérben, a szövetekben és a sejtekben nem kering elegendő oxigén a normál testi funkciók fenntartásához. Emberként nem arra vagyunk

<sup>3</sup> Oxigénhiányos állapot.

tervezve, hogy olyan magasságban létezzünk, mint amilyen magasságban a mai korszerű repülőgépek repülnek. A tüdőnek nincs meg a kapacitása és a képessége, hogy a magasan fekvő, alacsony oxigénsűrűségű környezetben a lehető legjobban működjön. Nagy teljesítményleadásnál a légzés az aerob energianyeréshez szükséges fokozott oxigénfelvételt nem tudja biztosítani a keletkezett tejsavval, valamint a felhasznált tartalékokkal egyenértékű oxigénhiány keletkezik [6].



2. ábra  
A hypoxia tünetei [a szerző]

A testi funkciókat érintő nyilvánvaló problémákon kívül a légi közlekedési környezetben a hypoxia elsődleges veszélye abból adódik, hogy az ebben az állapotban szenvedő emberek általában nem feltétlenül érzik az állapot kialakulását, vagy nem veszik észre, hogy ez történik, ami azt jelenti, hogy a hatások (a kognitív és fizikai teljesítmény csökkenése) egy ideig észrevétlenek maradhatnak. Két általános módszer létezik a hypoxia megelőzésére a repülésben. Az egyik a repülőgép kabinjának nyomás alá helyezése (a légnyomás mesterséges növelése). A másik módszer a levegőben lévő belélegezhető oxigén mennyiségének növelése kiegészítő oxigéntermelő rendszerrel (oxigénmaszk viselése) [7].

Céлом, hogy kutatásom során olyan mélyreható és kiterjedt vizsgálatokat folytassak, hogy képes legyek olyan javaslatok megtételére, amelyek válaszok lehetnek a jelenlegi légi közlekedésben fellelhető legégetőbb biztonsági kérdésekre. Ezek az eredmények nem csupán egy adott területen dolgozó személyzet problémáit kívánják felülvizsgálni, hanem a légi és űrközlekedésben minden érintett szakemberét egyaránt.



## 4. Korszerű diagnosztikai és monitorozási alternatívák

A biomonitorozás repülés során fontos tényező lehet a repülésbiztonság és az utasok, illetve a személyzet egészségének megőrzése szempontjából. Ennek során a test biológiai jeleit, például pulzust, vérnyomást, légzést, testhőmérsékletet és más fiziológiai paramétereket figyelik és rögzítik, hogy azok alapján értékeljék az utasok és a személyzet jóllétét.

A repülés során a következő területeken használható a biomonitorozás:

- utasok egészségének figyelése: a repülőgépen történő biomonitorozás lehetővé teszi az utasok egészségének és jóllétének folyamatos nyomon követését. Ez különösen fontos hosszú távú járatok során, ahol az emberek hosszú órákat töltenek a levegőben;
- repülőszemélyzet egészsége: a pilóták és a kabin személyzete fizikailag és mentálisan is megterhelő munkát végez a repülés során. A biomonitorozás segíthet azonosítani a stresszt és a fáradtságot, ami növelheti a repülésbiztonságot;
- azonnali segítségnyújtás: a biomonitorozás a repülőgépeken lehetővé teszi a repülési személyzet és a személyzet számára, hogy gyorsan észleljék és reagáljanak a vészhelyzetekre, például szívrohamokra vagy más egészségügyi problémákra;
- a repülésirányító és műszaki szakemberek egészségének figyelése. Náluk is jelen van a megnövekedett leterheltség és stressz, amelyek drasztikusan felgyorsítják a fáradtság kialakulását;
- hosszú távú egészségfigyelés: a repülőszemélyzetnek rendszeresen orvosi vizsgálatokat kell végeztetniük hosszú távú egészségük fenntartása érdekében, mivel a magasra emelkedett körülmények, a napfény-expozíció és más tényezők hatással lehetnek az egészségre.

A biomonitorozás lehetőségei a repülési szektorban folyamatosan fejlődnek, és olyan technológiák is rendelkezésre állnak, amelyek lehetővé teszik a repülési személyzet és az utasok egészségének valós idejű figyelését. Ez a módszer az egészségügyi biztonság egyik fontos eleme a repülési iparágban, és hozzájárulhat a repülési környezet javításához és a vészhelyzetekre való gyorsabb reakcióhoz [8].

A teljesítménydiagnosztika szerves részét képezi a korszerű diagnosztikai megoldások rendszerének [9]. Az emberiteljesítmény-diagnosztika egy olyan terület, amely az emberi képességek, készségek teljesítményelemzésből kinyert eredményeit használja fel annak érdekében, hogy jobban megértsük az egyének vagy csoportok teljesítményét a különböző területeken. A célja az, hogy meghatározza az egyén erősségeit és gyengeségeit, hogy lehetőséget teremtsen a tovább fejlődésre, illetve a hatékonyabb teljesítmény elérésére. Ezek az elemzések segíthetnek az oktatásban, a munkahelyi teljesítménymenedzsmentben, a sportban és természetesen a légi közlekedésben is. A teljesítménydiagnosztika számos eszközt és módszert foglal magában, például tesztek, értékeléseket, interjúkat, méréseket és monitorozást. Fontos, hogy az értékelés objektív és megbízható legyen, és az eredményeket a megfelelő kontextusban értelmezzék. Emellett a személyes adatvédelemre és etikai szempontokra is ügyelni kell az emberi teljesítmény diagnosztikája során. A teljesítmény hatékony mérése, elemzése és javítása a szervezeti sikert pozitív irányba befolyásolja [10].

## 5. Összegzés

Az emberi tényező szerepének repülésbiztonsági fókusszal való feltérképezését megkezdtem. Elsődleges célom, hogy kiemellem és hangsúlyozzam ezt a permanensen változó és sokrétű területet, amely kiemelt kockázati faktort jelent minden típusú repülési feladatban, legyen az a Föld légterében vagy azon kívül. Széles körű irodalomkutatást és mélyinterjúkat kezdeményeztem a témakörben. Ezt összevettem saját szakmai tapasztalataimmal, és analizáló munkát követően szintetizáltam ismereteimet, illetve vizsgálom ezeknek viszonyait és hatását a repülésbiztonságra. Ezek alapján feltártam, hogyan kellene felépíteni a humán tényező diagnosztikáját. A tanulmányban leírtak a következő feladatokat indukálták: a kutatásom során feltárt eredmények segítségével a humán faktor katonai kritikus környezetre, a légi közlekedés egészére, polgári-katonai szakemberekre gyakorolt hatását szükséges feltérképezni, miközben olyan ajánlásokat fogalmaznak meg, amelyek hozzájárulnak a Magyar Honvédség szakmai törekvéseihez. Továbbá elemezve a már rendelkezésre álló műszaki hátteret, illetve alkalmazói eljárásokat, ajánlásokat fogalmazok meg, amennyiben ez szükséges, az érintett területeken. Ezenfelül feltárom az adatgyűjtés és kísérleti tesztek keretén belül felmerült és vizsgált problémákat, kiemelve azok jelentőségét. Mindemellett a kutatott terület eredményeinek felhasználásával új szervezési rendek kidolgozását fejlesztem tovább, korszerű műszaki-technikai és információs megoldások adaptálásával. Végezetül átfogó javaslatokat teszek adott esetben jogszabályi, alkalmazói, illetve műszaki megoldásokra.

## Felhasznált irodalom

- [1] Palik M. szerk., *Légiközlekedés-biztonsági kutatások*. Budapest, Nemzeti Közzolgálati Egyetem (NKE). 2021.
- [2] Dudás Z., „A leggyakoribb hibák a légi közlekedésben,” *Repüléstudományi Közlemények* 32. évf. 3. sz. pp. 51–59. 2020. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.4>
- [3] J. Reason, *Human factors*. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
- [4] J. Reason, *The Human Contribution*. Burlington, CRC Press, 2008. Online: <https://doi.org/10.1201/9781315239125>
- [5] Dunai P., et al., „Az oxigéndeficit repülésbiztonsági jelentősége és lehetséges magyarázata agyi pulzoximetria NIRS eredményei alapján, szimulált repülési stresszhelyzetben,” in *Repüléstudományi tanulmányok*. Szilvássy L., Békési, B. szerk., Budapest, Ludovika, pp. 11–42. 2021.
- [6] Balog L. szerk., *Bevezetés a sportdiagnosztikába*. Debrecen, Campus, 2015.
- [7] Southern Wings, Hypoxia in Aviation. *Southernwings.co.nz*, 2023. január 23. Online: [www.southernwings.co.nz/hypoxia-in-aviation/](http://www.southernwings.co.nz/hypoxia-in-aviation/)
- [8] B. Mazur, 10 Essential Sensors for Body Sensor Networks. *Ignitec.com*, 2023. július 10. Online: [www.ignitec.com/insights/10-essential-sensors-for-body-sensor-networks/](http://www.ignitec.com/insights/10-essential-sensors-for-body-sensor-networks/)
- [9] Györe I., Dunai P., Szabó S. A., „Teljesítménydiagnosztika alkalmazása a repüléstudományi kutatásokban,” in *Repüléstudományi tanulmányok. Repüléstudományi szemelvények*. Szilvássy L., Békési, B. szerk., Budapest, Ludovika, pp. 43–108. 2021.
- [10] W. B. Abernathy, *Human Performance Diagnostics*. [h. n.], Performance Management Publications, 2012.

---

## ***Investigation of the Role of the Human Factor Using Advanced Diagnostic and Information Technology Tools with Special Emphasis on Biomedical Monitoring from the Perspective of Flight Safety***

*With its long-standing steady growth rate, air transport has become a dominant sector within the transport industries. In addition, airspace has become a major economic resource, whereas until now it was almost exclusively occupied by conventional (piloted) aviation. This is already placing a considerable burden on the professionals working in the field, especially the aircrew. Therefore, it is of paramount importance to have relevant information on the physiological status of pilots and to ensure the technical and aero-medical conditions for monitoring them. Medical recognition of risks and recommendations for their management are very important factors in maintaining overall aviation safety. Research in this area is therefore a priority from both a safety and a technical point of view. The introduction of new technology and testing methods and their application requires further detailed research, backed up by scientific results. These changes present many challenges, but also many opportunities, the mapping and scientific study of which is in the interests of military and national defence, as they can contribute greatly to the achievement of the objectives set by the Defence Forces and, through them, to the information dominance and leadership required in peacetime and beyond.*

**Keywords:** *human factors, flight procedures, CRM, diagnostics, information technology, risk analysis, flight safety*

---

Halmi Lajos  
doktori hallgató  
Nemzeti Köszolgálati Egyetem  
Katonai Műszaki Doktori Iskola  
[halmi.lajos@gmail.com](mailto:halmi.lajos@gmail.com)  
[orcid.org/0009-0000-7501-9871](https://orcid.org/0009-0000-7501-9871)

---

Lajos Halmi  
PhD student  
Ludovika University of Public Service  
Doctoral School of Military Engineering  
[halmi.lajos@gmail.com](mailto:halmi.lajos@gmail.com)  
[orcid.org/0009-0000-7501-9871](https://orcid.org/0009-0000-7501-9871)

---

Csató Péter

## A repülőipar új korszaka: a grafénban rejlő innováció

*A különféle 2D-anyagok közül a grafén az elmúlt 30 évben kiterjedt kutatási figyelmet kapott lenyűgöző tulajdonságai miatt. Felfedezése hatalmas lökést és új dimenziót adott az anyagkutatásnak és a nanotechnológiának. Napjainkban már számtalan, a grafén felhasználási lehetőségeit boncolgató kutatás folyik, ami nagymértékben elősegíti a katonai és polgári repülőipar fejlődését és a technológiai innovációt. Ez a cikk a grafén szerkezetének és főbb tulajdonságainak bemutatása után három szempontból foglalja össze a grafén repülőiparban való alkalmazási lehetőségeit: energetikai berendezések, szenzorok és repülőgép külső felületén használt anyagok területeken.*

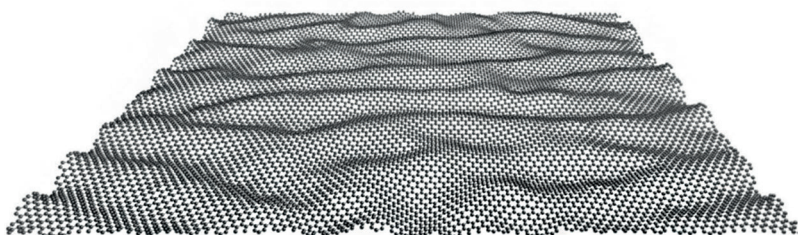
**Kulcsszavak:** grafén, szenzorika, energetika, külső borítás, nanotechnológia

### 1. Bevezetés

Az elmúlt években a nanotechnológia folyamatos fejlődésével az anyagok új generációja nyílt meg előttünk. Ezek közül kiemelkedően fontos a grafén, amely kiváló mechanikai, termikus, elektromos, optikai, tribológiai tulajdonságainak, az alacsony légáteresztő képességének és nagy fajlagos felületének<sup>1</sup> köszönhetően széles körben alkalmazható [1].

Philip Wallace kanadai fizikus már 1947-ben tanulmányt írt a grafit elektronikus viselkedéséről, amely jelentős érdeklődést váltott ki [2]. A Nobel-díjas kémikus, Linus Pauling 1960-ban már azt találgatta, hogyan viselkednének a szénatomok kétdimenziós, egyrétegű lapjai [3]. 1962-ben Hanns-Peter Boehm német kémikus elektronmikroszkóp segítségével végzett vizsgálatokat, és ezt az anyagot később „grafén”-nek nevezte el. 2004-ben a Manchesteri Egyetem fizikusainak, Andre Geimnek és Konsztantyin Szergejevics Novoszjolovnak először sikerült grafént izolálni egy grafit-tömb mikromechanikus hántolásával. Az így készült minták jó minőségűek voltak, kevés szemcsehatárral és rácshibával. Az eljárás olcsó, azonban a kapott felületegységre vetítve már drága [4].

<sup>1</sup> A fajlagos felület az anyag felületének és tömegének a hányadosa. A fajlagos felület tehát megadja a tömegegységnyi anyag összes felületét. Jele: A. Mértékegysége:  $\text{m}^2/\text{kg}$ .



1. ábra

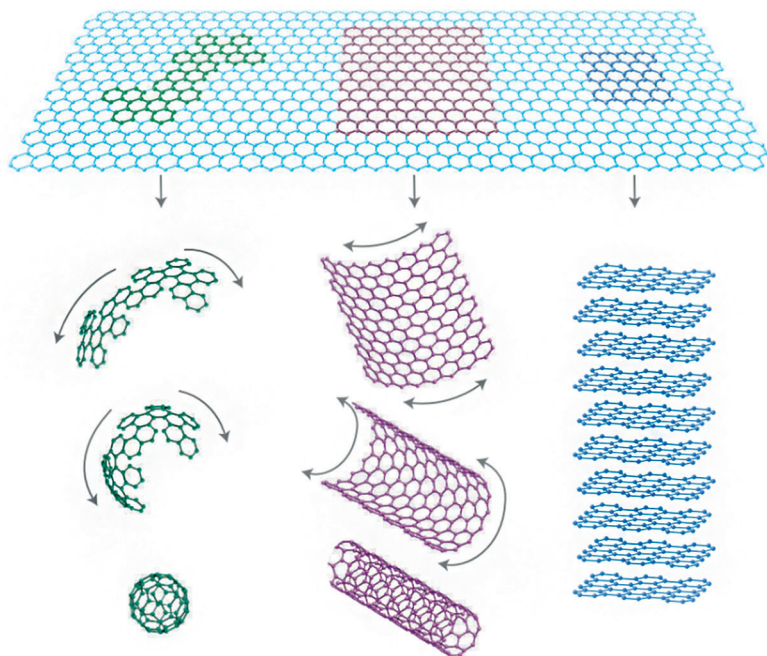
Grafénlemez numerikus szimulációs képe [5]

A grafén a szén egy nanoszerkezetű, allotrop<sup>2</sup> módosulata, amelyben méhsejtrácsos elrendezésben álló szénatomok egyetlen atom vastagságú grafitréteget alkotnak (1. ábra). A 2D-síkban lévő szénatomok erős elsőrendű kovalens kötással ( $\sigma$  kötással) kapcsolódnak egymáshoz. A 2D-síkra merőleges irányban gyengébb kötési energiájú  $\pi$  kötések jönnek létre, ami lehetővé teszi, hogy a grafén kisebb nyíróerővel, így jó tribológiai tulajdonságokkal rendelkezzen. (A szilárdtestfizikai értelmezése szerint ez valójában nem tökéletesen sík [2D-s], hanem felülete fodrozódik, amely a grafén síkbeli rácsrezgéseivel csatolásba kerülve stabilizálja a szerkezetet.) Ennek a szerkezetnek köszönhetően rendkívül rugalmas, ellenben nagy szilárdságú is, bizonyos értelemben erősebb, mint a gyémánt. Ennélfogva a betölteni kívánt funkciótól függően más szénnanoszerkezetek létrehozása is lehetséges a 2. ábrán látható módon. Emellett kiváló fényáteresztő képességgel és – kis sűrűségének köszönhetően – nagy elektromos és hővezető képességgel, valamint egyéb kiváló tulajdonságokkal is rendelkezik, ezért új lehetőségeket teremthet a légi járművek tervezésében, fejlesztésében, így forradalmasíthatja a repülőipart:

- mechanikai tulajdonságait kihasználva, kötőanyagokhoz és fémekhez adva könnyű, nagy teherbírású kompozit anyagot lehet előállítani;
- a grafén nagy fényáteresztő képessége felhasználható a napelemek területén;
- kiváló sűrűlódási tulajdonságaiból adódóan új típusú kenőanyag hozható létre;
- nagy fajlagos felületéből adódóan a grafénalapú szenzorok alkalmazásával számos esetben tömeg és helymegtakarítás érhető el [1].

Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhetően a grafént „Super Carbon”-nak is nevezik, és már napjainkban is számos helyen használják [6]. Ebben a cikkben röviden bemutatom a grafén alkalmazhatóságának lehetőségeit a repülőeszközök energetikai és elektronikai berendezéseiben, szenzorokban, a sárkányszerkezetben és a külső felületeken.

<sup>2</sup> Az elemek polimer módosulatait allotrop módosulatoknak, a jelenséget allotrópiának nevezik. Ez a kémiai reakciók olyan speciális fajtája, amikor az elem egyik allotrop módosulata átalakul egy másikká (pl. az oxigén gázból  $[O_2]$  elektromos kisülés hatására ózon  $[O_3]$  lesz, vagy igen nagy nyomáson a grafit gyémánttá alakul).



2. ábra

*Grafénból származtatott szén nanoszerkezetek:  
0 dimenziós fulleren, 1 dimenziós szén nanocső és 3 dimenziós grafit [7]*

## 2. Energetika

Az energetikai rendszerek folyamatos fejlesztése a repülőiparban elengedhetetlen a hatékonyság, megbízhatóság és fenntarthatóság magas szinten tartása érdekében. A grafén, különleges fizikai tulajdonságai miatt, új lehetőségeket nyit a repülőeszközök modernizálásában. A légi járművek energetikai rendszereiben a grafént jelenleg főként szuperkondenzátorokban és napelemekben alkalmazzák, de számos egyéb felhasználási lehetőséget is rejt magában.

### 2.1. Szuperkondenzátorok

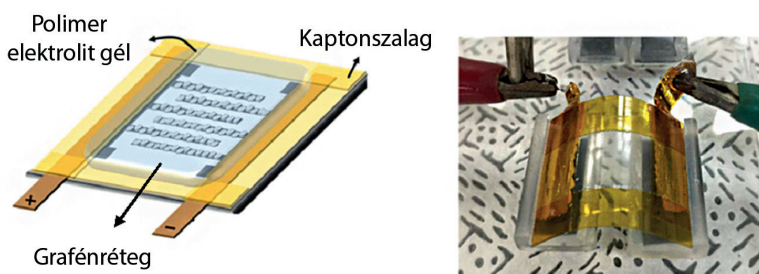
A szuperkondenzátor olyan energiatároló eszköz, amely nagy teljesítménysűrűséggel és hosszú élettartammal rendelkezik (több mint  $10^6$  ciklus), környezetterhelése alacsony, hiszen működése elektromos térképződésen alapul, nem pedig kémiai reakciókon, ezáltal nem tartalmaz olyan káros anyagokat, mint a hagyományos akkumulátorokban használt nehézfémek, emellett gyorsan képes energiát felvenni vagy leadni.



A szuperkondenzátorok energiátároló mechanizmusa elektromos kétrétegű kondenzátorokra és pszeudokapacitív kondenzátorokra oszlik. A kettős rétegű villamos kondenzátorok (EDCL<sup>3</sup>) az elektróda és az elektrolit között kialakított kettős rétegen keresztül tárolják az energiát.

A szuperkondenzátorok fő hátránya az alacsony energiasűrűség (2–10 Wh/kg), ami alacsonyabb, mint a savas ólomakkumulátoroké (20–40 Wh/kg), a nikkell-hidrogén akkumulátoroké (40–100 Wh/kg) és a kereskedelmi forgalomban kapható lítium-ion akkumulátoroké (100–200 Wh/kg). A grafén egyedülálló ultravékony 2D-szerkezete, nagy töltéshordozó mobilitása<sup>4</sup> ( $\mu = 15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ), ebből adódóan kiváló vezetőképessége (5000 S/cm), nagy fajlagos felülete (2620 m<sup>2</sup>/g), nagy elméleti fajlagos kapacitása (550 F/g) és a jó mechanikai tulajdonságai révén ideális anyagnak bizonyult szuperkondenzátor-elektrodákhoz. A grafén-elektrodák jelentősen, több mint tízszeresére, növelhetik energiasűrűségüket, és nagymértékben javíthatják teljesítménysűrűségüket [8]. Amennyiben grafént használnak szuperkondenzátor elektrodájaként, a fajlagos kapacitás körülbelül 100 mAh/g lesz. A repülőipar területén a szuperkondenzátorok széles körben használhatók. Például a futóműgondolák ajtajainak nyitásakor, a külső függesztmények leoldásakor vagy az utastér ajtajainak vészhelyzeti nyitásakor, mikor különösen erős, impulzusszerű energiára van szükség, illetve egyéb elektromos vészhelyzeti berendezések és segédrendszerek energiaigényének kiegészítésére alkalmazható.

A fejlesztés következő állomása, a flexibilis szuperkondenzátor nagyon ígéretes energiátároló eszköz, amelynek kulcsfontosságú eleme szintén a jó rugalmasságú és kiváló elektrokémiai teljesítményű grafén elektróda-alapanyagként való felhasználása. Fontos jellemzői a nagy fajlagos felület, a fejlett pórusszerkezet és a nagy szakítószilárdság. A rugalmas energiátárolás kutatása a jövőben az energetikai eszközök fejlesztésének egyik fontos iránya lesz. Bár a kondenzátor teljesítményét tekintve a 2D-anyagokból készült szuperkondenzátoroknak jelenleg nincs abszolút előnyük a háromdimenziós típusokkal szemben, azonban a nagy rugalmasságból, kis méretből és minimális tömegeből adódóan könnyen beágyazhatók akár a légijármű-vezető ruházatába (sisak, kesztyű), akár a szélvédőbe egy új generációs *head-up display*<sup>5</sup> elemeként [9] (3. ábra).



3. ábra

Illusztráció és fénykép egy grafénalapú mini-szuperkondenzátorról [10]

<sup>3</sup> EDCL – Electric Double Layer Capacitor.

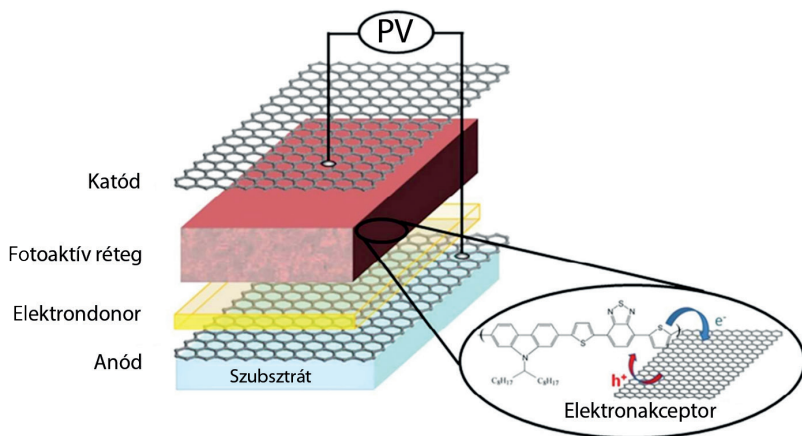
<sup>4</sup> Az *elektronmobilitás* a szilárdtestfizikában az a jellemző, amellyel az elektronok fémekben vagy félvezetőkben, elektromos mező hatására kialakuló mozgását írjuk le.

<sup>5</sup> Homloküveg-kijelző.

## 2.2. Napelemek

A napenergia hatékony tárolásának és felhasználásának kutatása évtizedek óta kulcsfontosságú feladat a fenntartható energiatermelés előmozdítása érdekében. A napsugárzás a fotovoltaikus rendszerek<sup>6</sup> segítségével gyakorlatilag korlátlan mennyiségben, biztonságosan és közvetlenül átalakítható olcsó és tiszta elektromos energiává a környezet közvetlen terhelése nélkül. Azonban az anyaghibákból, a beesési szögéből és még több tényezőbből adódóan a jelenleg legtöbb helyen alkalmazott szilíciumalapú napelemek hatásfoka 11–18% közötti, bár laboratóriumi körülmények között 23,5% is lehet [12].

A nagy fényátersztő képesség, nagy töltéshordozó mobilitás és mechanikai szilárdság miatt a grafén felhasználható fotovoltaikus rendszerek alapanyagaként elektródákban, funkcionális, abszorber- vagy félvezető rétegekben is (4. ábra). Mechanikai stabilitása és rugalmassága miatt elektródaként alkalmazva megoldhatja a hagyományos átlátszó vezető oxidok merevségének és ridegségének problémáit. A grafénréteg felvitele jelentősen javíthatja az anyag áttetszőségét és vezetőképességét, ezzel nagymértékben meghosszabbítva a légi jármű repülési idejét [13]. Bár a grafénalapú fotovoltaikus eszközök jelentős fejlődést értek el, a jövőben még mindig sok kihívással kell szembenéznük. Költséghatékony technológiát szükséges kidolgozni a grafénfilmek tömeggyártására, valamint elengedhetetlen figyelembe venni a grafénrétegek számának, az adalékolásnak és a funkcionalitásnak az eszköz általános teljesítményére gyakorolt hatását [14].



4. ábra

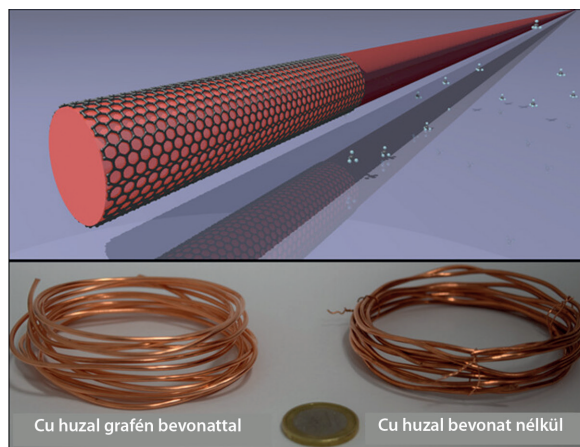
A megfelelően kezelt grafén felhasználható a napelem különböző komponenseiben, beleértve a katód-, anód- vagy fotoaktív rétegeket [15]

<sup>6</sup> A napelemcellákba beérkező sugárzás találkozik az ott található félvezető szilíciumréteggel, és elnyelődik, ezzel szabad elektronokat generálva. A szilíciumrétegben, illetve az alatta található vezető, közvetítő rétegben az elektronkilépés következtében elektromos tér keletkezik, ami a felszabadult elektronokat mozgásra kényszeríti, elektromos áramot hozva létre. Ez a jelenség bármilyen megfelelő spektrummal rendelkező fényforrás esetén lejátszódik [11].



### 2.3. Elektromos vezetékek

Az elektromos vezetékek két legelterjedtebb alapanyaga a réz és az alumínium. A rézet széles körben használják kiváló elektromos tulajdonságai miatt, de nagy fajlagos tömege ( $8,96 \text{ g/cm}^3$ ) a légi járművekben való alkalmazás esetén hátrányt jelent. Ez a szám önmagában elenyészőnek tűnik, de ha figyelembe vesszük, hogy egy Airbus A380 típusú repülőgépbe összesen megközelítőleg 530 km elektromos vezeték van beépítve, máris megfontolandó más anyagok használata [16]. Ilyen helyettesítő anyag lehet például az alumínium és ötvözetei, amelyek könnyebbek és jobb mechanikai tulajdonságokat biztosítanak, mint a réz, azonban vezetőképességük rosszabb. Az alumíniumalapú vezetékek átmérőjét növelni kell, hogy ugyanolyan elektromos teljesítményt érjünk el, mint a rézből készülteknél. Mivel a grafén kiváló elektromos vezető, ráadásul benne az elektronok mozgása rendkívül gyors ( $106 \text{ m/s}$ ), így ilyen bevonatot alkalmazva nő az élettartam és a vezetőképesség (1% közvetlenül a bevonat után, és akár 3% 24 hónap után), ami lehetővé teszi a kábelek átmérőjének csökkentését és ezáltal a gyártási költség és tömeg megtakarítását (5. ábra). Csökken továbbá a korrózió kialakulásának esélye is [1], [17].



5. ábra

Grafénbevonat réz vezetéken, digitális modellen és a valóságban [17]

### 3. Szensorika

Egy légi járművön körülbelül 2000–4000 érzékelő található, amelyeknek a repülésbiztonságban óriási szerepük van. A grafén sajátos tulajdonságai jelentős szerepet játszhatnak ezen a területen is. Többek között gázérzékelő, nyúlásmérő, elektrokémiai érzékelő, mágneses térérzékelő, illetve fotoelektromos érzékelő is létrehozható grafén felhasználásával, amelyek biztosíthatják a légi jármű üzemszerű és biztonságos működését.

### 3.1. Gázérzékelő szenzor

A gázérzékelő szenzor olyan elektronikus eszköz, amely egy adott gáz minőségét vagy mennyiségét képes mérni a környezetében. Számos területen alkalmazzák az ipari ellenőrzéstől kezdve a mezőgazdasági termelésen és orvosi diagnosztikán keresztül a közbiztonságig. A hagyományos gázérzékelők alapanyagai félvezető fém-oxidok, vezetőképes polimerek vagy szén nanocsövek lehetnek. Közülük a fém-oxidok terjedtek el leginkább, egyszerű gyártásuk, nagy érzékenyséjük és alacsony költségük miatt. Hiányosságai kiküszöbölése, mint például a magas hőmérsékletű működés és nagy energiafogyasztás, azonban még megoldatlan feladat. A vezetőképes polimerek fő hátránya az alacsony szelektivitás, hosszú távú instabilitás és irreverzibilitás. Idővel a szenzor egyre gyengébb jelet ad, és ez a folyamat visszafordíthatatlan, így a vezető polimereket tartalmazó szenzorok élettartama igen rövid. A szén nanocsövek alkalmazása nagymértékben csökkentheti az érzékelő működési hőmérsékletét, és nagyobb érzékenységet eredményezhet, de hosszú reakció- és helyreállítási ideje, valamint a gyártás összetett folyamata akadályozza a széles körű felhasználást [18].

Jelenleg a legtöbb gázérzékelő rezisztív elv<sup>7</sup> alapján működik. Ezek az érzékelők általában egy szigetelő hordozó anyagon alapulnak, amely kerámiából vagy szilícium-dioxidból készül, és gázérzékeny anyaggal van bevonva. Amikor a gáz érintkezik a gázra érzékeny felülettel, a gázmolekulák adszorbeálódnak, ami ellenállás-változást eredményez. Ennek mértéke alapján történik a gáz minőségi és mennyiségi mérése.

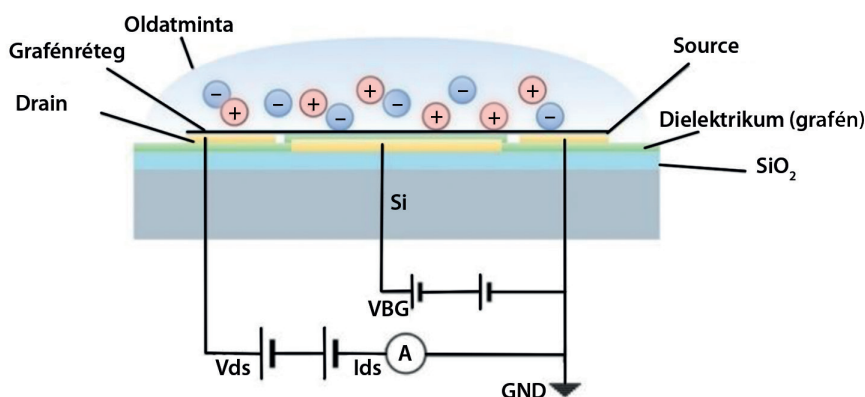
A grafén magas felület/térfogat arányának és kiváló félvezető tulajdonságainak köszönhetően a gázdetektálás terén is rendkívüli potenciált mutat. Nagy fokú érzékenységgel rendelkezik adott gázok jelenlétére, ami azt jelenti, hogy már a nagyon kis gázkoncentrációk is kimutathatók vele. Gyorsan reagál a környezeti változásokra, ami szinte azonnali érzékelést és visszajelzést tesz lehetővé. A repülőiparban ezek a szenzorok üzemanyag-szivárgások észlelésére, az utastér vagy pilótafülke levegőminőségének monitorozására, illetve a veszélyes gázok azonosítására használhatók, ezáltal növelve a biztonságot és a működési hatékonyságot [1], [18].

### 3.2. pH-szenzor

A korrózió folyamata spontán anyagromlás, amely szinte minden fémeket érint. A különböző szerkezeti elemek maximális élettartamának eléréséhez elengedhetetlen a karbantartás részeként az erre utaló jelek kutatása és a folyamat korai észlelése. A repülőeszközök szerkezetében található fémek, mint például az alumínium és a különböző acéltötvözetek különösen érzékenyek rá. Előfordulásukat tekintve gyakori az egyenletes, a pontkorrózió, a feszültségkorróziós törés és a korróziós kifáradás. A légi járművek szerkezeti felépítésének tervezésénél, ezen belül a megfelelő fémek, fémötvözetek kiválasztásánál nem azok ellenálló képessége, inkább az egyéb teljesítményjellemzők (tömeg, szilárdság, rugalmasság, elektromos jellemzők) képviselik az elsődleges szempontokat. Ennek következményeként egyre nagyobb hangsúlyt kap az oxidáció korai észlelhetőségének jelentősége. Ebben nagy szerepet kap a pH-mérés, mivel a folyamat során olyan reakciók zajlanak le, amelyek hatására savas vagy lúgos anyagok szabadulnak fel. Ennél fogva pH-érzékelőkkel megállapítható annak jelenléte és előrehaladásának

<sup>7</sup> A rezisztív elv azon alapul, hogy a gázkörnyezet megváltozása az ohmikus ellenállás arányos változásával jár.

mértéke. A légi járműveknél a pH folyamatos monitorozása elengedhetetlen a szerkezeti biztonságosság és tartósság érdekében. Ebben jelenthet nagy előrelépést olyan grafén-membránok bevonása, amelyek specifikus ionokra, molekulákra és környezeti tényezőkre érzékenyek. Az évek során számos pH-érzékelési módszert fejlesztettek ki. A legelterjedtebbek papírcsíkokon és üvegelektrodákon alapulnak, amelyeknek az alkalmazhatóságát korlátozza törékenyséjük, alacsony érzékenyséjük és a miniatürizálásra való alkalmatlanságuk [1]. Napjainkban a szenzorika nagyobb hangsúlyt fektet azokra a rendkívül érzékeny, de strapabíró miniatűr eszközökre, amelyek hosszú távon képesek biztosítani a pH-monitorozást, például optikai szálak, potenciálérzékelők és a jelenleg leghatékonyabb alternatíva, az ionszelektív térvezérlésű tranzisztorok (ISFET<sup>8</sup>). Mivel a grafén kiváló elektrokémiai reakcióképességgel rendelkezik, ellenállása a pH-érték növekedésével csökken, így a 6. ábrán látható módon ISFET-be építve egyszerűen kimutatható vele a korrózió mértéke az egyes fémfelületeken [20].



6. ábra

ISFET-alapú pH-szenzor grafén dielektrikummal és érzékelő réteggel [20]

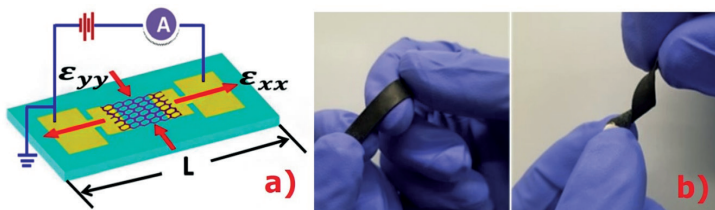
### 3.3. Nyúlásmérő bélyeg

A nyúlásmérő bélyeg (*strain gauge*) egy olyan érzékelő, amely az anyagokban fellépő mechanikai feszültségeket és deformációkat képes mérni. A légi járműveken ezeket az érzékelőket általában a sárkányszerkezeten a kritikus elemeken, például a szárnybekötéseknél, a függőleges és vízszintes vezérsíkon és a kormányoszlopokon helyezik el, így monitorozhatók és értékelhetők azok szilárdsági és merevségi paraméterei.

Ezek az érzékelők különösen fontos szerepet töltenek be a többcélú repülőeszközök esetében, ahol akár repülési feladatonként más-más terheléeloszlás figyelhető meg különböző függesztménykonfigurációk, valamint a sebességgel és nagy túlterheléssel (egyes esetekben 9-szeres) járó manőverek széles spektrumú változása miatt fellépő feszültségek következtében. A költségek csökkentésére és az eszközök miniatürizálására irányuló törekvéssel a hagyományos

<sup>8</sup> ISFET – Ion-Sensitive Field-Effect Transistor: olyan típusú érzékelő, amelyet ionok (kémiai elemek elektromosan töltött részecskéi) koncentrációjának érzékelésére terveztek [20].

szilícium félvezetők az utóbbi években kihívásokkal néztek szembe, és a nyúlásérzékelőkkel kapcsolatos legújabb kutatások a nanoanyagokra összpontosítottak. A grafén kompatibilis a jelenleg alkalmazott félvezetők gyártási technológiájával, illetve alkalmas alacsony frekvenciájú rezgések és a szélsőséges körülmények között fellépő feszültségek érzékelésére. A közelmúltban végzett tanulmányok megmutatták, hogy az ebből készült nyúlásmérő bélyegek pontos, gyors és megbízható méréseket tesznek lehetővé, így nagy szerepük lehet a repülésbiztonság növelésében [21]. Az ilyen nyúlásérzékelő felépítésének sematikus diagramja a 7/a. ábrán, egy grafén-szilikon polimer nyúlásérzékelő pedig a 7/b ábrán látható.



7. ábra

Nyúlásmérő sematikus ábrája (a) [22] és grafén-PDMS nanokompozit nyúlásérzékelő (b) [23]

## 4. Külső felületen használt anyagok

A légi járművek tervezése és fejlesztése során kiemelten fontos a megfelelő építőanyag kiválasztása. Számos kutatás középpontjában áll az új anyagok és technológiák keresése, amelyekkel növelhető a repülőgépek hatékonysága, biztonságossága és csökkenthető környezetterhelése. A grafén integrálása a sárkányszerkezetbe forradalmi változásokat hozhat ezen a téren is.

### 4.1. Kerekek

A repülőipar fejlődésével a gumiabroncsok egyre nagyobb gurulási sebességnek, terhelésnek és egyre magasabb hőmérsékletnek vannak kitéve, ami megköveteli, hogy nagy ellenálló képességűek és hosszú élettartamúak legyenek. Az abroncsok egyik fő alkotóelemeként a futófelület nagymértékben meghatározza annak minőségét. A természetes gumit széles körben alkalmazzák abroncsokban kiváló mechanikai tulajdonságai, jó szakítószilárdsága és rugalmassága miatt. A futófelület használat közbeni károsodása elsősorban a mechanikai és a kifáradásos sérüléseket és a hőkárosodásokat foglalja magában. Mivel a gumi hővezető képessége mindössze 0,18 W/mK, a földet érés pillanatában keletkező hőt a kerekek nem képesek hatékonyan leadni, így gyorsan felforrósodnak, tovább rontva azok mechanikai tulajdonságait. A másik probléma, hogy a légkörrel való kölcsönhatás következtében a légi jármű elektrosztatikusan feltöltődik. A statikus elektromosság elvezetése a földelést követően úgynevezett testkábel alkalmazásával lehetséges.

A gumik földelési funkciójának javítása érdekében szén vagy más vezető anyag hozzáadására került sor. Azonban ez jelentősen csökkentheti azok szilárdságát, szívósságát, hőelvezetését

képességét és egyéb fizikai tulajdonságait. A gumik általános megerősítése érdekében  $\text{SiO}_2$  és egyéb adalékok kerültek a gumiba, ami csökkenti a vezetőképességet. Ezen ellentmondásra kínálhat megoldást a nanorészecskék alkalmazása. A grafén-oxid adalékolása a hagyományos megerősítő anyagokkal együtt egy bizonyos szintig növelheti a hő- és az elektromos vezetőképességet, javíthatja a tapadást és a kopásállóságot. Csökkenthető a vulkanizációs idő, és mivel nagyszámú oxigéntartalmú funkciós csoportja miatt vízben jól diszpergál, egyenletesen keverhető gumi latexszel [24].

## 4.2. Villámvédelem

A repülőiparban a lehető legkisebb szerkezeti tömeg igénye nagy teljesítményű, szénszálat és epoxigyantát tartalmazó kompozit anyagok kifejlesztéséhez vezetett. Az elmúlt néhány évben használatuk fokozatosan növekedett, és egyre több helyen vették át a fém alkatrészek szerepét. A hagyományos szerkezeti anyagokhoz, például alumíniumhoz, titánhoz és acélhoz képest a kompozitok könnyebbek, bizonyos esetekben nagyobb szilárdságúak, és korrózióállóak is [1].

Mivel azonban rossz elektromos vezetők, ezért a Faraday-kalitka-elvű villámvédelmet nem biztosítják, így villámcsapás következtében könnyen megsérülnek. Ezt a problémát az anyag rétegei közé alumínium- vagy rézháló beépítésével lehet megoldani, ami jelentős tömeg- és költségnövekedést eredményez (8. ábra).



8. ábra

*Apró lyukak, az elektromos kisülések nyomai egy Boeing 787-es törzsen, amelyet villámcsapás ért (2022. 05. 07-én). A külső felület festése alatt villámvédelmi fémháló látható [31]*

A villámcsapás hatásainak elkerüléséhez jó vezetőképességű, grafénnal erősített szénszálas kompozit anyagot kell készíteni. A fémhálók eltávolításával a repülőgép nemcsak könnyebb lesz, de a grafénnal megerősített kompozitok fokozott szilárdsága miatt a szerkezeti integritása sem sérül. Így a grafén ígéretes kiegészítő anyaga lehet a repülőiparban alkalmazott kompozitoknak [25].

Kiváló példa erre a Grupo Antolin-Ingenieria és az Airbus által létrehozott Airbus A350 vízszintes vezérsíkjának belépő éle, amely grafénalapú CFRP-<sup>9</sup> kompozit felhasználásával készült (9. ábra). A fejlesztők szerint az elem jobb mechanikai és termikus tulajdonságokat mutatott grafén hozzáadása után. Ez jelentős üzemanyag-megtakarítást, így kisebb költségeket és károsanyag-kibocsátást eredményez [26].



9. ábra

*Airbus A350 vízszintes vezérsík belépőélének grafén CFRP-eleme [26]*

### 4.3. Korrózióvédelem

Bár a korrózió megjelenését elkerülni nem lehet, a folyamat tanulmányozható és megfelelő eszközökkel a sebessége lassítható és a károk csökkenthetők.

A leggyakrabban használt és leghatékonyabb korrózióvédelmi módszer a szerves bevonattal való kezelés, amellyel elkerülhető a fém és a környezetben lévő korrozív közeg közötti közvetlen érintkezés, így csökkentve a fém kémiai vagy elektrokémiai reakciójának lehetőségét. A hagyományos szerves bevonatok jelentős része azonban mérgező nehézfémeket, például kromátot, ólmot és cinket tartalmaz, ami biztonsági és környezetszennyezési kockázatokkal jár. Előállításuk nemcsak nagy mennyiségű energiát fogyaszt, hanem a társadalom és a gazdaság fenntartható fejlődése szempontjából is rendkívül kedvezőtlen.

Az egyrétegű grafén, a legvékonyabb ismert korrózióvédő anyag, kiváló védőbevonatot képez, amely megakadályozza, hogy az oxigén- és vízmolekulák elérjék a fémfelületet. Ezen túlmenően a grafén vezetőképes polimerekkel (polianilinnal) alkotott kompozitja tovább javíthatja a fémekkel szembeni korrózióvédelmét, és egyedülálló termikus, elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik [27].

<sup>9</sup> CFRP – Carbon-Fiber Reinforced Polymer: szénszálerősítésű polimer.



#### 4.4. Jégtelenítés

0 °C körüli vagy az alatti külső hőmérséklet esetén a repülőgép jégtelenítése döntő fontosságú. A belépő éleken kezdődő jégképződés megzavarja a lamináris légáramlást és nagymértékben növeli a légellenállást, illetve használhatatlanná teheti a kormánysszerveket, megakadályozva azok megfelelő mozgását. A szívócsatornák belépő keresztmetszeténél képződő jég leválásakor pedig a hajtóműbe való bekerülésével súlyos károkat képes okozni. Ez komoly repülésbiztonsági kockázatot jelenthet a repülőgépre, így a pilótákra és az utasokra nézve is. A jelenlegi jégtelenítési és jegesedésgátló megoldások főként kémiai úton (felszállás előtt vegyszerekkel való permetezés) előzik meg a kialakulást, vagy fizikai úton (vibrációs vagy pneumatikus) destabilizálják a jeget. Alternatív megoldásként már az elektrotermikus jégtelenítő rendszereket is használják.

Új, hatékonyabb termikus eljárást dolgoz ki, a már nagy számban alkalmazott, CFRP-anyagból készült szárnyak jégtelenítésére a német DLR.<sup>10</sup>



10. ábra

Szénszál-erősítésű kompozit szárny jégtelenítése a német DLR-módszerrel [32]

Az orrdoboz felületébe már gyártáskor további, nagy ellenállású szénszálhuzalokat építenek be (10. ábra), amelyek feszültség alá helyezve hőt termelnek. E belső, közvetlen fűtés hatására a szárnyra tapadó jég szinte azonnal elolvad vagy gőzzé válik.

A legkorszerűbb rendszerek fém- vagy kompozit szerkezetből állnak, amelyeket nagy mennyiségű grafit- és koromrészecskéket tartalmazó polimerrel vonnak be, hogy megfelelő elektromos vezetőképességet biztosítsanak a hatékony jégmentesítéshez. A grafén komplex 3D-szerkezetekbe való integrálhatósága, kis tömege, nagyobb hatékonysága alacsonyabb energiafogyasztás mellett kulcsfontosságú előnyöket jelent a repülőgépek jégtelenítésében. Egy erre a célra kifejlesztett rezisztív fűtő grafénfólia felületének hőmérséklete a bemeneti feszültség változtatásával könnyen szabályozható. Figyelembe véve a legnagyobb hőáram-sűrűséget és a –32 °C-os környezeti hőmérsékletet, egy 1 mm vastag jégréteg 7 percnél rövidebb idő alatt megolvasztható. Ennek megvalósíthatóságát kísérletsorozattal igazolták, és az eredmények azt mutatják, hogy a kidolgozott módszer nagyon hatékony termoelektromos stratégia lehet, amely csökkenti a káros környezeti hatásokat [28].

<sup>10</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

## 4.5. Juno

A Central Lancashire Egyetem repüléstechnikai mérnökei a Manchesteri Egyetem Nemzeti Grafén Intézetével és a Sheffield Advanced Manufacturing Research Centerrel és számos más vállalkozással együttműködve egyedülálló pilóta nélküli légi járművet fejlesztettek ki. Ez a világ első grafénborítású drónja, a „Juno” (11. ábra). A 3D-nyomtatott alkatrészekkel és grafénakkumulátorokkal ellátott, 3,5 méteres szárnyfesztávolságú Juno, grafénalapú villámvédelemmel és jégtelenítő rendszerrel van felszerelve. A grafénból készült szárny kisebb szerkezeti tömegű, ami 17%-kal könnyebb a hagyományos szén-szálak kompozitnál, így csökkent az üzemanyag-fogyasztás és növekedett a hasznos teher. A Juno fejlesztése úttörő vívmányt jelent a repülőiparban, hiszen egyszerre mutatja be a grafén gyakorlati alkalmazásának számos aspektusát, megalapozva ezzel a jövőbeli fejlesztéseket és felhasználási lehetőségeket [29].



11. ábra  
A „Juno” [30]

## 5. Összegzés

A repülőipari kutatás-fejlesztésnek mindig kulcsfontosságú területe volt a repülőeszközök szerkezeti optimalizálása és a szerkezeti tömeg csökkentése. Ennek eredményeként a légi járművek szerkezetében egyre nagyobb százalékban vannak jelen különféle kompozit anyagok és nanoarchitektúrák.

Az előzőekben bemutatott sokrétű alkalmazás csupán töredéke a jelenleg is folyó számtalan kutatásnak, amely a grafén felhasználásának lehetőségeivel foglalkozik. Rövid- és középtávon a nagyobb teljesítmény, a jobb mechanikai és elektromos tulajdonságok és a minimális tömeg ígérete indokolja a grafén további kutatását. Hosszú távon pedig ez a szerkezeti anyag forradalmasíthatja a repülőipart, olyan innovációkat és fejlesztéseket kínálva, amelyek meghatározó hatással lehetnek a repülés jövőjére. Ennek megvalósíthatóságához azonban sok kihívást le kell még küzdeni. Az egyik ilyen akadály a jó minőségű grafén megbízható



tömeggyártására szolgáló technológia hiánya. Emellett nem elhanyagolható a repülőipari szabványok által támasztott szigorú követelményeknek való maradéktalan megfelelés és a tanúsítványok megszerzésének hosszú és költséges folyamata. Az új anyagoknak megbízhatóan kell működniük rendkívül alacsony és magas hőmérsékleten egyaránt, illetve ellen kell állniuk nagy mechanikai és vibrációs terhelésnek, valamint széles sugárzási spektrumnak. A repülés során végrehajtott feladatok által támasztott alapvető kockázat és a környezeti feltételek olyan anyagok használatát követelik meg, amelyek megfelelnek ezeknek a szigorú minősítési és tanúsítási szabványoknak. Bár jelenleg még távol vagyunk attól, hogy a grafént a légi járművek alapvető szerkezeti anyagai közé sorolhassuk, további kutatási és fejlesztési munkával mindezek a problémák megoldhatók, nyitva hagyva az utat a grafén szélesebb körű alkalmazása felé a légi közlekedésben.

## Felhasznált irodalom

- [1] S. Y. Gao, et al., *Research Status and Prospect of Graphene Materials in Aviation*. Cornell University, 2022.
- [2] P. R. Wallace, „The Band Theory of Graphite,” *Physical Review*, 71. évf. 9. sz. pp. 622–634. 1947. Online: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
- [3] L. Pauling, *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry*. New York, Cornell University Press, 1960.
- [4] K. S. Novoselov, et al., „Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,” *Science*, 306. évf. 5696. sz. pp. 666–669. 2004. Online: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [5] Dobrik, G., *Szén alapú nanoarchitektúrák kialakítása és jellemzése pásztázószondás módszerekkel*. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2015. Online: <https://doi.org/10.15476/ELTE.2014.088>
- [6] H. Boehm, „Graphene – How a Laboratory Curiosity Suddenly Became Extremely Interesting,” *Angewandte Chemie International Edition*, 49. évf. 49. sz. pp. 9332–9335. 2010. Online: <https://doi.org/10.1002/anie.201004096>
- [7] A. Masuk, D. G. Husi, „Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV,” *Recent Innovations in Mechatronics*, 9. évf. 1. sz. pp. 1–5. 2022. Online: <https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>
- [8] S. Zheng, et al., „Graphene-Based Materials for High-Voltage and High-Energy Asymmetric Supercapacitors,” *Energy Storage Materials*, 6. évf. pp. 70–97. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.10.003>
- [9] M. Soota, „The Quest for Supercarbon in Aviation,” *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 7. évf. 1. sz. pp. 10–13. 2020.
- [10] K. Lee, et al., „Highly Transparent and Flexible Supercapacitors Using Graphene-Graphene Quantum Dots Chelate,” *Nano Energy*, 26. évf. pp. 746–754. 2016. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.030>
- [11] Magyar Napelem és Napkollektor Szövetség, *Fotovoltaikus jelentése*. 2020. január 20. Online: [www.mnnsz.hu/fotovoltaikus-jelentese/](http://www.mnnsz.hu/fotovoltaikus-jelentese/)
- [12] J. Dréon, et al., „23.5%-Efficient Silicon Heterojunction Silicon Solar Cell Using Molybdenum Oxide as Hole-Selective Contact,” *Nano Energy*, 70. évf. p. 104495. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104495>

- [13] L. Ponyaev, et al., „Graphene Technology for Design Efficiency of the Solar Hybrid Electrical Cryoplane and Airships,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226. évf. 2022. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012063>
- [14] G. T. Chavan, et al., „A Brief Review of Transparent Conducting Oxides (TCO): The Influence of Different Deposition Techniques on the Efficiency of Solar Cells,” *Nanomaterials*, 13. évf. 7. sz. p. 1226. 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/nano13071226>
- [15] K. P. Loh, et al., „Graphene and Graphene-like Molecules: Prospects in Solar Cells,” *Journal of American Chemical Society*, 138. évf. 4. sz. pp. 1095–1102. 2016. Online: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b10917>
- [16] M. I. Baranov, „A Choice of Acceptable Sections of Electric Wires and Cables in On-Board Circuits of Aircraft Electrical Equipment,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1. évf. pp. 39–46. 2020. Online: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.06>
- [17] N. Mishra, et al., „Industrial Graphene Coating of Low-Voltage Copper Wires for Power Distribution,” *ACS Applied Engineering Materials*, 1. évf. 7. sz. pp. 1937–1945. 2023. Online: <https://doi.org/10.1021/acsaenm.3c00249>
- [18] K. G. Ong, et al., „A Wireless, Passive Carbon Nanotube-Based Gas Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, 2. évf. 2. sz. pp. 82–88. 2002. Online: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2002.1000247>
- [19] S. Z. N. Demon, et al., „Graphene-Based Materials in Gas Sensor Applications: A Review,” *Sensors and Materials*, 32. évf. 2. sz. pp. 759–777. 2020. Online: <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2492>
- [20] L. Li, M. Chakik, R. Prakash, „A Review of Corrosion in Aircraft Structures and Graphene-Based Sensors for Advanced Corrosion Monitoring,” *Sensors*, 21. évf. 9. sz. p. 2908. 2021. Online: <https://doi.org/10.3390/s21092908>
- [21] A. Mehmood, et al., „Graphene Based Nanomaterials for Strain Sensor Application – A Review,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8. évf. 3. sz. p. 103743. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103743>
- [22] X.-W. Fu, et al., „Strain Dependent Resistance in Chemical Vapor Deposition Grown Graphene,” *Applied Physics Letters*, 99. évf. 21 sz. p. 213107. 2011. Online: <https://doi.org/10.1063/1.3663969>
- [23] M. A. O'Mara, et al., „Ultrasensitive Strain Gauges Enabled by Graphene-Stabilized Silicone Emulsions,” *Advanced Function Materials*, 30. évf. 32. sz. p. 2002433. 2020. Online: <https://doi.org/10.1002/adfm.202002433>
- [24] X. Duan, et al., „Synergistically Enhanced Thermal Control Ability and Mechanical Properties of Natural Rubber for Tires Through a Graphene/Silica with a Dot-Face Structure,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5. évf. 2. sz. pp. 1145–1157. 2022. Online: <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00453-y>
- [25] A. Trilok, et al., „Use of Graphene in Aircraft Structures for Enhanced Lightning Strike Protection – An Overview,” *International Journal of Technology and Emerging Sciences*, 2. évf. 2. sz. pp. 6–8. 2022.
- [26] S. A. Hodge, et al., *Trajectory of Graphene-Based Aerospace Applications*. Executive summary, Versairen plc, 2020. Online: [www.versairen.com/files/7115/9741/2495/Whitepaper\\_Aerospace\\_applications\\_VRS.pdf](http://www.versairen.com/files/7115/9741/2495/Whitepaper_Aerospace_applications_VRS.pdf)
- [27] Z. Duan, „Application of Graphene in Metal Corrosion Protection,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 493. évf. 2019. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/493/1/012020>

- [28] L. Vertuccio, et al., „Effective De-Icing Skin Using Graphene-Based Flexible Heater,” *Composites Part B: Engineering*, 162. évf. pp. 600–610. 2019. Online: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>
- [29] B. Vaidya, „Juno: World's First Graphene Skinned Plane,” *Inceptive Mind*, 2018. augusztus 15. Online: [www.inceptivemind.com/juno-worlds-first-graphene-skinned-plane/2710/](http://www.inceptivemind.com/juno-worlds-first-graphene-skinned-plane/2710/)
- [30] M. Usama, „A Graphene Skinned UAV,” *Droneblow*, 2018. augusztus 16. Online: <https://dronebelow.com/2018/08/16/a-graphene-skinned-uav/>
- [31] S. Georgilidakis, „ACCIDENT: Lightning Strikes Cause 787 Skin Damage,” *Mentour Pilot*, 2022. május 17. Online: <https://mentourpilot.com/accident-lightning-strikes-cause-787-skin-damage/>
- [32] J. Whitney, „German Aerospace Center Developed De-Icing Technology Using Carbon Fiber,” *Military-Aerospace Electronics*, 2019. február 1. Online: [www.militaryaerospace.com/commercial-aerospace/article/14229984/german-aerospace-center-developed-de-icing-technology-using-carbon-fiber](http://www.militaryaerospace.com/commercial-aerospace/article/14229984/german-aerospace-center-developed-de-icing-technology-using-carbon-fiber)

---

## ***The New Era of the Aviation Industry: Innovation in Graphene***

*Among the multitude of two-dimensional materials, graphene has garnered significant scientific interest over the past three decades due to its remarkable properties. Its discovery has catalysed a profound expansion and diversification within materials research and nanotechnology. Currently, several research projects are dedicated to explore the potential applications of graphene, thereby significantly advancing both the military and civil aviation sectors in addition to technological innovation. After presenting the structure and primary properties of graphene, this paper outlines the expected applications in aviation industry focusing on power systems, sensors and materials used on the outer surface of the aircraft.*

**Keywords:** *graphene, sensors, energetics, external coating, nanotechnology*

---

Csató Péter, MSc  
doktori hallgató  
Nemzeti Közszerológiai Egyetem  
Katonai Műszaki Doktori Iskola  
[csato.peter@stud.uni-nke.hu](mailto:csato.peter@stud.uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0002-9515-5376](https://orcid.org/0000-0002-9515-5376)

---

Péter Csató, MSc  
PhD student  
Ludovika University of Public Service  
Doctoral School of Military Engineering  
[csato.peter@stud.uni-nke.hu](mailto:csato.peter@stud.uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0002-9515-5376](https://orcid.org/0000-0002-9515-5376)

---

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”



AZ NKFI ALAPBÓL  
MEGVALÓSULÓ  
PROGRAM

Viktória Kesztyűs

## Possibilities of Air Force Cooperation in the Visegrad Countries

*Air force cooperation in the Visegrad Countries is an important and hardly studied field of interest. In my research, I studied previous and actual V4 cooperation, with a focus on defence cooperation. With the help of interviews of professionals from different fields of expertise, I tried to highlight the possibilities for an air force cooperation in the V4. I created summary tables based on open-source information, the main goal of which is to present the current equipment and capabilities of the Czech Republic, Hungary, Poland, and Slovakia. I have also made an attempt to sum up the previous joint military cooperation between the Visegrad Group countries, in order to make predictions for the future.*

**Keywords:** V4, air force cooperation, air defence, Baltic Air Policing, flight safety, NATO, EU Battlegroup

### 1. Introduction

In his 'heartland theory', Sir Halford John Mackinder has written the followings: "Who rules Eastern Europe commands the Heartland /Who rules the Heartland commands the World Island/ Who rules the World Island commands the world" [9]. With this quote I would like to reflect on the important role of the Central European region in the world. Thus, Visegrad cooperation was created as a forum for the validation and implementation of Central European interests and goals. Since the 14<sup>th</sup> century, the Visegrad cooperation has played a decisive role not only in the politics of Central Europe, but also of the entire continent. In addition to the political, economic and social cooperation that is increasingly revived in the modern age, it is important to highlight the group's military past. In my current thesis, I would like to focus on the cooperation of the air forces within the military field, and I would like to shed light on the future possibilities of this.

Looking at a specific force such as the air force within the military field, I would like to answer the following questions: is it even possible to develop a potential cooperation between the air forces of the Czech Republic, Poland, Hungary and Slovakia? From the point of view of the different countries, is there enough willingness, capacity and infrastructure to implement such a cooperation? If not, what are the factors impeding these plans? If it is possible to establish cooperation between the air forces, in which areas is it possible, and how could it be carried out in the most expedient way? To answer these questions, I consider it essential

to analyse the previous military cooperation of the Visegrad countries, as well as to take stock of the capabilities and assets of the four air forces. At this point, I see it as necessary to clarify the concept of air force. The English literature basically distinguishes between two concepts, the terms "air force" and "air power". "Air force" means the air force itself, which includes tools, resources and infrastructure that can be used to achieve goals (military and political) of the given state. "Air power" refers to aerial capabilities that a given armed force uses when conducting operations in the airspace.

With the help of the interviews I conducted, I would like to give a complex answer to the questions asked above, as well as to map the areas that offer opportunities for cooperation.

## 2. The Visegrad Group

The Visegrad Group or the Visegrad Four (V4) is a cooperation between the Czech Republic, Hungary, Poland, and Slovakia. Their relationship started centuries before, in 1335, when Hungarian king Charles I organised the Congress of Visegrad to solve different issues in the region. Motivated by the Congress of 1335, on 15 February 1991 another historical meeting was held participated by the President of the Czechoslovak Republic, Václav Havel, the Prime Minister of the Republic of Hungary, József Antall, and the President of the Republic of Poland, Lech Wałęsa. On that day the Visegrad Group was born, the cooperation has started between the three countries. Initially, they had four main ideas [12]:

1. to eliminate the remnants of the communist bloc in Central Europe;
2. to overcome historic animosities between Central European countries;
3. through joint efforts it will be easier to achieve accomplishing social transformation and joining to the European integration process;
4. to approach political ideas.

Most of these ideas came into reality during the years of cooperation. From 1993, the Czech Republic and Slovakia took the place of Czechoslovakia due to the disintegration. In 1999 and 2004 the Visegrad Group fulfilled the third point as well: the Czech Republic, Hungary and Poland joined the NATO in 1999, in 2004 all countries became members of the European Union (and Slovakia also joined the NATO). These were the most important goals in the V4's history. After joining the EU, the Visegrad Group was not so active in the field of cooperation but the 21<sup>st</sup> century brought its new challenges.

One of the Visegrad Group's greatest successes was that double food quality was recognised in EU law. It means that products under the same brand have lower quality in Eastern Europe than in Western. Another success story was the International Visegrad Fund. "Visegrad Fund annually allocates approximately EUR 8 million to hundreds of Visegrad cooperation projects and mobility programs across Central and Eastern Europe" [11]. It supports artists, scientists, student exchange programmes, etc. Besides, IVF has significant cooperation with the Western Balkans region. "V4 have been demonstrating a long-standing commitment to the Western Balkans: Albania, Bosnia and Hercegovina, Kosovo, Montenegro, North Macedonia and Serbia, supporting cooperation, stability, development and the European perspective of the region" [11].

From the point of my research, it is also essential to talk about V4 Defence Cooperation. Due to the escalating Russian tensions at the Eastern flank of NATO, the rising of China and nowadays the constantly changing security environment motivated V4 Ministers of Defence to adopt a strategy entitled Long Term Vision of the Visegrad Countries on their Defence Cooperation. The main priority areas were:

- establishing multinational formations and contributing to multinational forces and initiatives;
- harmonising defence planning and capability development;
- improving joint education, training and exercises to enhance interoperability,
- cooperating with partners [12].



Figure 1.  
*Signing of the Visegrad Declaration [14]*



Figure 2.  
*Map of the Visegrad Group [13]*



### 3. Former military cooperations

Besides defence cooperation, the Visegrad Group has had several common projects on the field of military. It is essential to mention here the biggest framework organisations: NATO, EU and the UN.

After becoming NATO members in 1999, the V4 countries' military personnel service has started. However, we can mention many missions where military personnel from Visegrad Countries served together, we cannot speak about directly organised V4 planning or common training. It almost never happened that all the four countries served at the same place and time, but there were good practices for cooperation 2 by 2. In KFOR (Kosovo Force) all V4 members have taken part, currently a high number of personnel are still involved [7]. SFOR (Stabilisation Force) in Bosnia or Resolute Support Mission in Afghanistan are also worth to mention. Located on the Eastern Flank, taking part as leader nations in the following missions has been inevitable: NATO Forward Presence, NATO Response Force, NATO Readiness Initiative. In the frame of these NATO projects, international cooperation strengthens the common border of the Alliance. NATO's Multinational Division Centre Command (HQ MND-C) has been established in Hungary and reached initial operational capability in 2023. "HQ MND-C assumed operational responsibility for the central area between the division-level commands already established in the region, in Elbag, Poland, and Bucharest, Romania, which are almost 1,200 km apart in a straight line. HQ MND-C has thus become a kind of gap-filler" [3]. Last but not least, the most important NATO mission from air force perspective is obviously Baltic Air Policing. It ensures integrity and security in the airspace of the 3 Baltic States. Polish, Hungarian and Czech fighter jets serve in the region time to time [1].

I would like to highlight the Polish–Hungarian cooperation in United Nations Interim Force in Lebanon (UNIFIL). In this peacekeeping mission Poland and Hungary serves together in the same battalion and execute common training.

Talking about the Visegrad Countries' military cooperation, it is inevitable to mention V4 EU Battlegroup (V4 EU BG). This battlegroup is the only military mission carried out by just the V4 countries' own forces. "European Union Battlegroups (EUBGs) are military units of the EU at tactical level, with around 1,500 troops and capable of carrying out tasks within a 6,000 km radius of Brussels. Their readiness for deployment is defined as 5 to 10 days after the unanimous decision of the Council of the EU to launch the operation. Two battle groups should be on standby every six months" [3]. The V4 EU BG was set up three times: in 2016, 2019 and 2023, mostly in V4+ format (with the cooperation of Ukraine, Croatia and Latvia). From the perspective of air force cooperation, I would like to enhance the 2023 formation where air operations were executed by the Czech and Polish Air Force.



Figure 3.  
*Visegrad EU BG [15]*

4. V4 air forces



Figure 4.  
*Aircrafts of the Czech Air Force [16]*





Figure 5.  
Aircrafts of the Polish Air Force [16]



Figure 6.  
Aircrafts of the Hungarian Air Force [16]



Figure 7.  
Aircrafts of the Slovakian Air Force [16]

## 5. Possibilities of air force cooperation

Based on my previous research, I have unfolded five main areas where air force cooperation could be carried out most efficiently:

- training, exercises, education;
- pilot selection, recruitment;
- radar data exchange;
- air defence (NATO Baltic Air Policing);
- flight safety.

Before presenting each possible field of cooperation, I find it inevitable to discuss conditions which are necessary to create and deepen an air force cooperation. First of all, the most important is common political thinking which is also currently the greatest obstacle in front of the Visegrad Group. Each nation has their own priorities, goals and interests which makes very hard to build common ground. Secondly, similar equipment and doctrines are needed to create interoperability. It is partly given thanks to NATO membership, but the new equipment mostly increased the distance between the V4 countries. Another serious problem is the lack of certain air capabilities (for example air-to-air refuelling). As a result, it can be stated that air force cooperation could only be created within the NATO framework.

Despite the difficulties, there is one big common goal in V4: air defence. There are several existing missions in this field. Firstly, Slovakian airspace is protected by Czech and Hungarian fighter jets because Slovakia currently lacks this capability. V4 countries (except Slovakia) take part in the NATO Baltic Air Policing mission. It would be a useful initiative to organise joint participation and common training and exercises before this.

In order to establish an effective air defence, it is essential to develop radar data exchange. This capability enables member countries to monitor other airspaces as well as their own. It helps in detecting air activities and giving a quick reaction to any violation.

According to my research, the biggest potential is on the field of training, exercise and education. For example, creating a common fighter pilot training would save money and time for each country. This would have meant that fighter pilot candidates should not have had to be sent to the US for training, because it could have been carried out at a base where all the Czech, Hungarian, Polish and Slovakian pilots could be trained. However, different aircraft types can cause problems, but at the moment we have a similar case in US training as well. Flight training could work on the same rules in all four countries, which would make it easier to continue the training together in the following phases. A mobilisation for air force personnel could be created (like Erasmus) which would help deepening professional knowledge, improving language skills and facilitating interoperability in the future. These fields of cooperation could be organised along the lines of the Hungarian JTAC (joint terminal attack controllers) training. Exercises could be planned as former air defence artillery exercises in the Visegrad Group [5]. On the field of special training, where only a few personnel are trained every year, joint training would be cost-effective and provide a higher quality of training. Another important area is pilot recruitment which is a big challenge for the V4 air forces now. Conferences were held in order to synchronise the procedure of selection and consider different ways to broaden the possibilities of recruitment [4].

Last but not least, I would like to mention one of the most important fields of cooperation: flight safety. Cooperation in flight safety has worked efficiently for decades. Talking about V4 air force cooperation, this field should be highlighted as an already operating aspect. Annual conferences are held where actual accidents are discussed, results of previous investigations are published and experiences are shared. This kind of thought and experience sharing is very useful in case of an accident or a flight safety issue. Several examples were mentioned when an investigation was solved thanks to the help of another member country.

## 6. Conclusions

In addition to answering key questions on the present topic, my research confirmed the following hypotheses for the future of cooperation:

1. Cooperation between air forces has a right to exist in the Visegrád Group.
2. The main goal is to protect common NATO airspace against threats from outside.
3. The possibility of cooperation currently exists in the following areas: trainings, practices, education; pilot selection, recruitment; radar data exchange; air defence/air policing (NATO Baltic Air Policing); flight safety.
4. The biggest obstacle to cooperation is different political thinking, goals and interests.

Overall, in terms of the results, we can say that the cooperation between the V4 air forces has a future in several fields. It could take place within the framework of NATO and serve the purpose of protecting the common airspace. Alignment of political views is critical for establishing strong cooperation, which in the current geopolitical situation does not provide the most favourable conditions for the future, but cooperation is still taking place in different fields.

## References

- [1] NATO, *Baltic Air Policing*. [s. a.]. Online: <https://ac.nato.int/missions/air-policing/baltics>
- [2] Interview with Jakub Bornio, PhD, Assistant Professor at the University of Wrocław and a Senior Analyst of the Institute of Central Europe in Lublin, Poland.
- [3] J. Bornio, *The Development of Military Cooperation as Part of Multinational Units among Visegrad Countries (V4) in 2023*. Instytut Europy Środkowej, 20 September 2023. Online: <https://ies.lublin.pl/en/comments/the-development-of-military-cooperation-as-part-of-multinational-units-among-visegrad-countries-v4-in-2023/>
- [4] A. Drnek, "“Future Air Force Conference 2023 – Pilot Training” Kicks Off," *Cz Defence*, 14 September 2023. Online: [www.czdefence.com/article/future-air-force-conference-2023-pilot-training-kicks-off](http://www.czdefence.com/article/future-air-force-conference-2023-pilot-training-kicks-off)
- [5] J. Feryna, "Common V4 Air Defence," *Cz Defence*, 28 March 2022. Online: [www.czdefence.com/article/common-v4-air-defence](http://www.czdefence.com/article/common-v4-air-defence)
- [6] Interview with Colonel Zoltán Jobbágy, PhD, Scientific and International Deputy Dean of the Military Science and Officer Training Faculty of the Ludovika University of Public Service.
- [7] KFOR Official Website, *Contributing Nations*. [s. a.]. Online: <https://jfcnaples.nato.int/kfor/about-us/welcome-to-kfor/contributing-nations>
- [8] Interview with Brigadier General Dr. József Koller, former Acting Commander of HDF Air Force Command.
- [9] M. Rosenberg, What Is Mackinder's Heartland Theory? ThoughtCo.com, 10 September 2018. Online: [www.thoughtco.com/what-is-mackinders-heartland-theory-4068393](http://www.thoughtco.com/what-is-mackinders-heartland-theory-4068393)
- [10] Interview with Major General Zoltán Somogyi, Head of Department, State Aviation Accident Investigation Department, Ministry of Defense State Secretary's Secretariat for Public Administration.
- [11] [www.visegradfund.org/archive/results/visegrad/](http://www.visegradfund.org/archive/results/visegrad/)
- [12] [www.visegradgroup.eu/](http://www.visegradgroup.eu/)
- [13] Map of Visegrad Group. Online: <https://depositphotos.com/hu/photos/map-of-the-visegrad-group.html?filter=all&qview=222799532>
- [14] [www.facebook.com/visegradfund/photos/a.445067817696/10154148866452697/?type=3](https://www.facebook.com/visegradfund/photos/a.445067817696/10154148866452697/?type=3)
- [15] Ministry of Defence & Armed Forces of the Czech Republic, *V4 EU Battlegroup Serves Its First Rotation*. [s. a.]. Online: [www.army.cz/scripts/detail.php?id=122886&tmplid=538](http://www.army.cz/scripts/detail.php?id=122886&tmplid=538)

---

## A légierők együttműködésének lehetőségei a visegrádi országokban

Kutatásom célja a V4-légierők közötti együttműködés lehetőségeinek feltárása, a lehetséges szinergiák feltérképezése, illetve a visegrádi csoport eddigi katonai kooperációjának megvilágítása. Katonai területen belül is egy olyan specifikus haderőnemet tekintve, mint a légierő, szeretnék választ adni a következő kérdésekre: lehetséges-e egyáltalán együttműködés kialakítása Csehország, Lengyelország, Magyarország és Szlovákia légierője között? A különböző országok szemszögéből nézve van-e elég hajlandóság, kapacitás és infrastruktúra egy ilyen kooperáció megvalósításához? Ha nem, melyek azok a tényezők, amelyek gátat szabnak ezeknek a terveknek? Ha lehetséges egy légierők közötti együttműködés megteremtése, az mely területeken valósítható meg, illetve

*hogyan lehetne ezt a legcélravezetőbben kivitelezni? Az információgyűjtést tartalomelemzéssel és mélyinterjúk készítésével végeztem. Számos hazai és külföldi forrást elemeztem. Az adatgyűjtés során csak nyílt forrásból származó információkkal dolgoztam, a végső konklúziót is ezek alapján vontam le.*

**Kulcsszavak:** V4, légierő, EU, NATO, V4 EU harccsoport, légierős együttműködés

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kesztyűs Viktória, BSc<br>hallgató<br>Nemzeti Köszolgálati Egyetem<br>Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar<br>Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék<br><br><a href="mailto:vkesztyus@gmail.com">vkesztyus@gmail.com</a><br><a href="https://orcid.org/0009-0009-6142-1654">orcid.org/0009-0009-6142-1654</a> | Viktória Kesztyűs, BSc<br>Student<br>Ludovika University of Public Service<br>Faculty of Military Science and Officer Training<br>Department of Aerospace Controller and Pilot Training<br><br><a href="mailto:vkesztyus@gmail.com">vkesztyus@gmail.com</a><br><a href="https://orcid.org/0009-0009-6142-1654">orcid.org/0009-0009-6142-1654</a> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Supported by the ÚNKP-23-1-I-NKE-27 New National Excellence Program of The Ministry for Culture and Innovation from the Source of the National Research, Development and Innovation Fund.



Terpecz Gábor, Schuster György

## Személyzet nélküli eVTOL légi járművek biztonsági kihívásai

*Az elkövetkező években az okosvárosok létrejöttével a légi mobilitás (UM) és azon belül a fejlett légi mobilitás (AAM) forradalmi változások előtt áll. A technológiák fejlődésével új légi járművek és azok új alkalmazási területei jelentek meg. Azonban ezek a fejlesztések olyan új biztonsági kihívásokat is hoztak magukkal, amelyek megoldása nélkül a biztonságos alkalmazásuk nem lehetséges. A továbbiakban a légi mobilitás jövőbeni biztonsági kihívásainak átfogó vizsgálatára és amennyiben lehetséges, a megoldások ismertetésére kerül sor annak érdekében, hogy az új technológiák és szolgáltatások bevezetése biztonságos és fenntartható módon történjen.*

**Kulcsszavak:** eVTOL, dróntechnológia, városi légi közlekedés, biztonság, fejlett légi mobilitás, okosváros

### 1. Bevezető

Az elektromos meghajtású függőlegesen emelkedő és leszálló repülőgépek, vagyis az eVTOL<sup>1</sup>-ok, ígéretes fejlesztésnek számítanak a légi közlekedésben, új lehetőségeket hozva magukkal, de gyors elterjedésük és a velük járó innováció mögött számos biztonsági kihívás is felmerül. Az eVTOL-ok biztonsága szempontjából kulcsfontosságú tényezők a széles körű elfogadás és a sikeres integráció. A fenti kihívásokhoz kapcsolódnak az elektromos meghajtás, a repülési rendszerek, az automata irányítás, valamint a személyzet nélküli légi járművek és a földi infrastruktúra közötti koordináció problémái.

A biztonságos és hatékony üzemeltetés érdekében fontos, hogy a tervezők és a jogalkotók szorosan működjenek együtt a kihívások megoldásában, hogy a személyszállító eVTOL-drónok valóban megfeleljenek a magas biztonsági követelményeknek és szabványoknak, így járulva hozzá a jövő légi közlekedési rendszereinek fenntartható fejlődéséhez.

### 2. Biztonsági kihívások

A következőkben azokat a biztonsággal kapcsolatos problémákat tekintjük át, amelyek csak részben megoldottak, vagy megoldásra várnak. Ezek olyan problémák, amelyeket mind

<sup>1</sup> Electric Vertical Take-Off and Landing Aircrafts – elektromos, függőlegesen fel- és leszálló légi jármű.

a Smart City,<sup>2</sup> mind az AAM<sup>3</sup> koncepció biztonsága érdekében mindenképpen meg kell oldani. Ezek a következők.

## 2.1. A standardok hiánya

Annak ellenére, hogy a rendeletek célja az egységesítés, az egyes tagállamok eltérő módon alkalmazzák és érvényesítik a szabályokat hivatkozva arra az uniós alapelvre, hogy a rendeletek tagállami alkalmazása szigorúbb lehet, de megengedőbb nem. Ezért bizonyos tagállamok különböző okokból szigorúbb nemzeti előírásokat vezettek be, amelyek túllépik az EU<sup>4</sup> szabványait, ez pedig következtetlenségeket eredményez, amely megnehezíti a határokon átnyúló UAS<sup>5</sup>-műveletek megfelelő végrehajtását. Ennek jó példája a hazánkban szakmaként megjelenő „Növényvédelmi drónpilóta” képzés, amely már elnevezésében is meglehetősen abszurd. 2022-ben a képzéshez belépési követelményként eleinte elég volt egy, az EU által egységesen elfogadott A2 kompetenciatanúsítvány [6, p. 51] megszerzése. Ez napjainkban már egy „pilóta nélküli légi jármű-irányítói igazolvány” [14], [16] megszerzéséhez kötött, amelynek a költsége irreálisan magas, nemzetközi elfogadottsága pedig kétséges. Az A2 kompetenciatanúsítványhoz elég az egyéni felkészülés, egy jelenléti elméleti vizsga és egy nyilatkozat a szükséges gyakorlati jártasság meglétéről. A pilóta nélküli légi jármű-irányítói igazolvány megszerzése viszont egy, a jogszabályban meghatározottak alapján akkreditált képzőintézmény által szervezett tanfolyam elvégzéséhez, sikeres jelenléti elméleti és gyakorlati vizsga teljesítéséhez kötött. Tehát ha valaki rengeteg pénzt és energiát fektet a pilóta nélküli légi jármű-irányítói igazolvány megszerzésébe, előfordulhat, hogy más országokban azt nem fogadják el. Ezek a tények sokakat eltántoríthatnak a jogkövető magatartástól. Ez komoly repülésbiztonsági kockázatot hordoz magában.

## 2.2. Légtérhasználati szabályok és előírások

Ahogy a napjainkban már elterjedt drónoknak, így az eVTOL személyzet nélküli légi járműveknek is meg kell felelniük a helyi és nemzetközi légi szabályozásoknak. Ez magában foglalja a légtérhasználati szabályokat, a repülési magasság korlátozásait, repülési zónák betartását és sok más biztonsági szabályozást. Az USA-ban az FAA PART 106, az EU-ban a 2019/945 és 947-es végrehajtási rendeletben a fentiek közül sok megtalálható ugyan, de az említett szabályozások rengeteg hiányt, anomáliát és biztonsági problémát tartalmaznak. Tekintsük át a teljesség igénye nélkül a legfontosabbakat. További problémákat vet fel a képzések minősége. Több esetben előfordult, hogy a képzést követően pár hónappal a képesítést szerzettek jelentős része a képzés kimeneti követelményében (már ha volt olyan) meghatározottak töredékével rendelkezett csak.

<sup>2</sup> Smart City – okosváros.

<sup>3</sup> Advanced Air Mobility – fejlett légi mobilitás.

<sup>4</sup> European Union.

<sup>5</sup> Unmanned Aircraft System.



## 2.3. A szabályok bonyolultsága

A EU 2019/947 rendelet viszonylag részletes, de helyenként bonyolult szabályokat tartalmaz, amelyeket a drónok tulajdonosainak, üzemeltetőinek meg kellene érteniük és be kellene tartaniuk. Sajnos ez nem mindig sikerül. A rekreációs kezdő felhasználók számára ezek a szabályok sok esetben nehezen érthetők a többnyire jogi megfogalmazások miatt. Noha a rendeletek értelmezéséhez a későbbiekben rendelkezésre állnak AMC-<sup>6</sup> és GM-<sup>7</sup> dokumentumok, sajnos több esetben azok sem adnak eléggé részletes magyarázatokat. Ez pedig tagországonként eltérő alkalmazást jelent.

## 2.4. A szabályok betartásának ellenőrzése

A drónok tevékenységének hatékony felügyelete nehézségekbe ütközik a drónok számának és sokféleségének köszönhetően. A drónpiac gyors növekedése meghaladta a szabályozó testületek nyomon követési és megfelelőségi képességeit. Ez különösen problémás az alacsonyabb kockázatú „nyílt” kategóriás műveletek esetében, amelyek nem igényelnek szabványos légi közlekedési megfelelőségi eljárásokat [7], [8, p. 6]. Az EU 2019/945-ös rendelet előírja osztályazonosító feltüntetését a kereskedelmi forgalomba hozott drónok csomagolásán, ám sajnos megfelelő ellenőrzés hiányában ezeket az érintett felek gyakran elmulasztják (1. ábra, 2. ábra).



1. ábra

Egy világhírű német makettgyártó cég osztályazonosító nélkül forgalmazott drónja egy hazai német üzletláncban [20]

<sup>6</sup> Acceptable Means of Compliance.

<sup>7</sup> Guidance Material.



2. ábra

*Egy hazai webshopban forgalmazott, osztályazonosító nélküli ázsiai drón [17]*

## 2.5. Nem, vagy csak kevésbé alkalmazkodó szabályozás

Az egyik legnagyobb probléma az, hogy a rendeletek néha nem képesek lépést tartani az állandóan változó technológiákkal és az iparági gyakorlatokkal. Ez komoly problémát okozhat mert a jogszabályok gyorsan elavulhatnak, vagy nem megfelelőek a fejlettebb dróntechnológiákra alkalmazva. Az eVTOL-ok megjelenése önmagában nem okozott nagy problémát a repülőiparnak, mert itt még csak többnyire az elektromos meghajtás és annak sajátosságai okoztak változást. Ettől eltekintve minden, a légi közlekedésben már megszokott jogszabály és szabvány gond nélkül alkalmazható volt. Az eVTOL-ok személyzet nélküli, utasokat szállító változatai és azok szabályozása már komoly kihívás elé állította a teljes iparágot és a jogalkotókat, mivel mind technológiában, mind a műveletek terén komoly biztonsági kockázatokat hordoznak magukban. Ennek következtében néhány rendelkezés gyorsan elavulttá vált, vagy nem tudta követni az új technológiai fejlesztéseket.

## 2.6. Korlátozott rugalmasság

Az EU 2019/945 és 2019/947 rendeletei adott esetben nem nyújtanak elegendő rugalmasságot a különböző felhasználási esetekhez vagy iparági kihívásokhoz való alkalmazkodáshoz. Az innovatív drónalkalmazások és új technológiák megjelenése gyorsabb ütemben zajlik, mint ahogy azt a szabályozások képesek lennének követni. Ez jelentősen korlátozhatja a drónok innovatív felhasználását, vagy nehézségeket okozhat a specifikus üzleti igények kielégítésében. Ez a merevség gátolja az új technológiák bevezetését és az iparági fejlődés növekedését.

Jó példa erre a német Volocopter esete. A cég több, nagy sikerű külföldi bemutató repülés után elhatározta, hogy a Párizsi olimpián sportolókat, hírességeket utaztat a repülőterekről az olimpiai faluba a VoloCity nevű dróntaxival (3. ábra). Az EASA lassú ügykezelése következtében a VoloCity ez idáig nem kapta meg a szükséges tanúsításokat, így nem végezhet kereskedelmi műveleteket, ezért az olimpiára kitűzött célt az eredetileg tervezett időpontban nem tudta elérni.



3. ábra  
A VoloCity bemutató repülése Párizs felett [24]

## 2.7. Az engedélyezési folyamatok hosszúsága és bonyolultsága

Az engedélyezési folyamatok sok esetben hosszúak és bonyolultak lehetnek, ami nehézségeket okozhat az új dróntechnológiák bevezetésében és alkalmazásában. Tipikus példa, hogy egy katasztrófavédelmi szervezet drónokat használna tüzesetek, földrengések, árvizek és egyéb természeti katasztrófák helyszíneinek felmérésére és a mentési műveletek koordinálására. Azonban a drónok működtetésére vonatkozó szigorú szabályok miatt az adott szervezet nehézségekbe ütközik a drónok gyors bevetésében és használatában, különösen sürgős helyzetekben, ahol minden perc számít. Ez a szabályozási merevség akadályozza a hatékony és gyors reagálást például katasztrófahelyzetekben.

## 2.8. A nemzetközi összhang hiánya

Bár az EASA vonatkozó rendeleteit az egész EU-ban kötelezően alkalmazzák, hiányzik az összhang más, nem EU-s országok drónszabályozásaival. Ez nehézségeket okozhat a határokon

átnyúló műveleteknél vagy a külföldi piacokon való részvételben. A CAA<sup>8</sup> (Anglia) és az FAA<sup>9</sup> (USA) szabályozása mutat némi összhangot az EU-s rendeletekkel, de alapjaiban véve sok különbséget is tartalmaz.

## 2.9. Tagállami eltérések

Az EU-tagállamok hatáskörébe tartozik a végrehajtási rendeletnek megfelelő implementáció, sok esetben ez mégsem egységes. Ez különösen a drónokkal kapcsolatos képzések és kompetenciavizsgák terén jelentős. Például az összes tagállamban az A1/A3 kategóriák képzései az adott állam szakhatósága által kijelölt szervezetnél valósulnak meg, online elvégezhető (beleértve a vizsgát is) és általában teljesen ingyenesek. A hazai gyakorlat ezzel szemben teljesen más: online képzés és vizsga, 6990 Ft illeték [13].

A fentiek tekintetében nem meglepő, hogy a hazai dróntulajdonosok jelentős része például az osztrák Austrocontrolnál<sup>10</sup> végzi a képzést és a vizsgát online, minden költség nélkül. Mivel az EU 2019/947 rendelet a fent említett kategória kompetenciaismereteit helyezi állami hatáskör alá, máris egy újabb problémával találkozunk. Ez pedig a könyvkiadóknál már rég ismert „predátorok” megjelenése. Ez a kifejezés jelen esetben olyan cégeket takar, amelyek drónos képzésekkel jelennek meg a kereskedelmi piacon úgy, hogy a „dróntörvény”<sup>11</sup> megjelenése előtt sem az oktatáshoz, sem a drónokhoz semmi közük nem volt. Egyetlen céljuk az anyagi haszonszerzés.

Ismert olyan eset, amikor egy drónokat is forgalmazó cég „oktatásának” jelentős részét nem a szakmai tudás átadása képezte, hanem az általuk forgalmazott drónok marketingje és a drónok megvételére való ösztönzés. Tehát a gyanútlan résztvevő marketingért fizetett jelentős összeget képzés címén.

## 2.10. Adatvédelem és a magánélet védelme

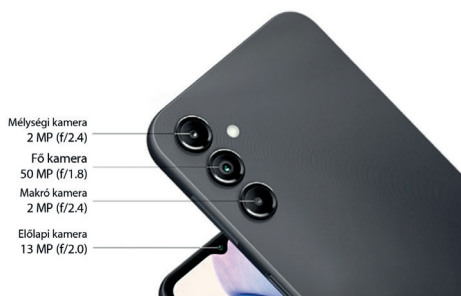
Köztudott, hogy a repülési műveletek során a drónok képesek lehetnek adatokat gyűjteni, amelyek érzékeny információkat is tartalmazhatnak. Ezért fontos a megfelelő adatvédelmi intézkedések meghozatala. Ez GDPR-szempontról nagyon fontos tényező. A drónműveletekkel kapcsolatos adatvédelmi intézkedések megtalálhatók az EU/2019/947-es rendeletben. Ezek a rendelkezések helyénvalók, de megalkotásukkor nem ártott volna mérlegelni a körülményeket. Ugyanis ezek az intézkedések kivétel nélkül kizárólag a gyártókra és az üzemeltetőkre vonatkoznak. Azonban felvetődik egy kérdés: Mi történik akkor, ha egy személyszállító eVTOL-on tartózkodó utas (vagy utasok) mobiltelefonjának kamerájával (4. ábra) rögzíti az egész repülést?

<sup>8</sup> Civil Aviation Authority.

<sup>9</sup> Federal Aviation Administration.

<sup>10</sup> Ausztria repülésirányító szervezete.

<sup>11</sup> EU 2019/947.



4. ábra

Egy átlagos 2024-es mobiltelefon modell kamerái [2]

Az EU irányelv szerint egy 80 g tömegű mini drón (6. ábra) 5 megapixeles kamerájával GDPR<sup>12</sup>-kockázatot jelent, amelyet feltétlenül szabályozni kell, addig egy alsó kategóriás (10-20 megapixel) okostelefonnal rendelkező eVTOL-utas korlátlanul rögzítheti (5. ábra) a teljes repülési útvonalon, akár 300 m magasból, lefedve mindazt, amit egy kamerás, maximum 100 m hatótávolságú játék drón tulajdonosa regisztráltan és felelősségbiztosítással tehet meg.



5. ábra

Felvétel készítése utasszállító drónból [15]



6. ábra

Ryze/DJI Tello Edu mini drón [19]

<sup>12</sup> General Data Protection Regulation – általános adatvédelmi rendelet.



A GDPR-szabályok maximális betartása mellett egyre elképzelhetőbb egy másik biztonsági kockázat is. Ez pedig az illegális adatgyűjtés. Az USA-ban felmerült annak a gyanúja, hogy nagy kínai dróнгyártók termékei a repülésük közben rögzített adataikat átadják a kínai kormánynak [5], [9]. Ez pedig a GDPR-on túlmutató nemzetbiztonsági problémát jelenthet.

## 2.11. Környezeti tényezők

A drónok repülése környezeti tényezőktől függően veszélyessé válhat. Például szeles időjárás, eső vagy hóesés, magas hőmérséklet stb. befolyásolhatja a drón repülési képességeit és stabilitását. A meteorológiai prognózisokkal jelentősen el lehet kerülni a meteorológiából adódó tényezőket, ha azok nem hirtelen kialakulásúak és gyors lefolyásúak. Vannak olyan tényezők, amelyek nem láthatók előre. Ilyenek például a nagy testű vagy rajokban repülő madarak. Az ezekkel való ütközés nagyban veszélyezteti az adott művelet biztonságát.

A drónok és az AAM-műveletek biztonsága sok aggodalomra ad okot, kiváltképp, ha autonóm üzemmódban működnek. Ilyenkor a műveleti területek a városok és más, lakott vagy beépített területek felé tolódnak el (7. ábra). A fentiekén túl, a légterek használóinak egy teljesen új, zavaró tényezővel kell szembenézniük, és számításba kell venniük a drónok üzemeltetéséből adódó biztonsági kockázatokat, mivel már nem támaszkodhatnak az olyan hagyományos módszerekre, mint a „látni és elkerülni” elv betartása.

A fejlett városi légi közlekedésben egyes víziók szerint a légi járművek alacsony magasságban, emberek és épületek közelében repülnek, ami azt jelenti, hogy az esetlegesen bekövetkező drónbalesetek jelentős hatással lehetnek a közösségekre. A közvéleménynek bíznia kell abban, hogy a személyzet nélküli, autonóm és más új műveletek biztonságosak. Ennek érdekében fel kell mérni, kommunikálni és mérsékelni kell a meglévő műveletekre és az új technológiával való interakcióra gyakorolt szélesebb körű hatását az érintett felek között. A fentiekén túl a társadalmi elfogadottság jelentős szempont lehet. Ezen a téren is akad még sok tennivaló. Például a Párizsi olimpia kapcsán, a párizsi önkormányzati képviselők egyhangúlag a dróntaxi-konceptió ellen szavaztak, 15 000 aláírást gyűjtöttek össze, és 2024. június 21-re tüntetést szerveztek [10].



7. ábra  
A NASA jövőképe [21]

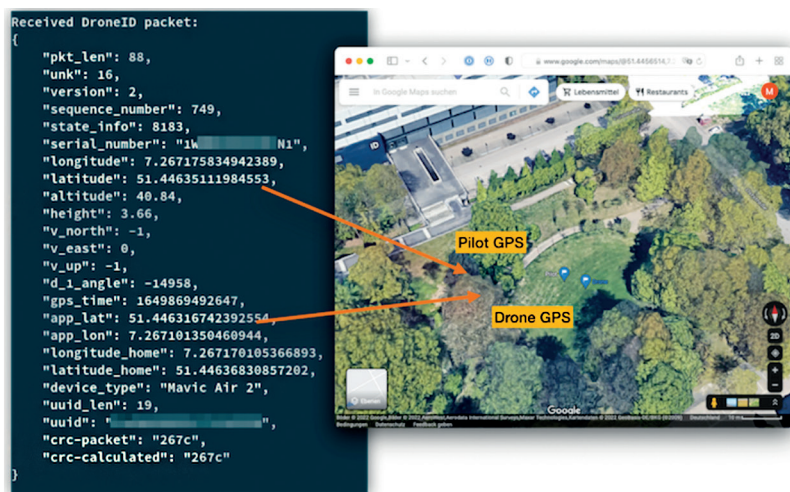
## 2.12. Kommunikációs protokollok

Mivel a drónok folyamatosan kommunikálnak a földi egységgel, fontos, hogy a kommunikációs protokollok biztonságosak legyenek. Kiemelten fontos annak biztosítása, hogy a drón és a földi egység között ne legyen lehetőség illetéktelen hozzáférésre vagy zavarásra. A drónokhoz kapcsolódó szoftverek és rendszerek különösen sérülékenyek lehetnek a kibertámadásokkal szemben. Ez a hazánkban nagymértékben elterjedt kínai drónokra sajnos különösen igaz.

Ha a drónokhoz használt szoftverek nem megfelelően védettek, vagy nem frissítik őket rendszeresen, akkor azokat fel lehet használni olyan törvénytelen tevékenységekre, mint az adatlopás, lehallgatás vagy más kiberbűncselekmények.

Például a DJI egyik szabadalmaztatott protokollja semmiféle titkosítással nem rendelkezik, ezért egy olcsó elektronikai eszközzel a drón helyzete és irányítójának pozíciója könnyedén visszafejthető (8. ábra) [12]. Ezt a protokollt használja a DJI egyik, a drónok felderítésére fejlesztett „csúcsterméke” is. A személyzet nélküli utasszállító eVTOL-ok a többi drónhoz hasonlóan számos számítógépes rendszert alkalmaznak, amelyek kiberbiztonsági fenyegetéseknek vannak kitéve.

A kiberbűnözők támadásai a repülésirányítási rendszerek, a navigációs rendszerek és az adatkommunikációs rendszerek meghibásodásához, vagy illetéktelen adatgyűjtéshez, súlyosabb esetben az útvonal vagy az úti cél nem kívánt módosításához vezethetnek. A gyártóknak és üzemeltetőknek ezért hatékony kiberbiztonsági intézkedéseket kell bevezetniük.



8. ábra  
A DJI ID-adatainak visszafejtése [4]

## 2.13. Szabotázs és terrorcselekmények elleni védelem

Aggudalomra ad okot, hogy a drónokat az AAM- vagy más műveletek során terrorcselekményre vagy csempészetre használják fel. Ez különösen igaz a nagyobb méretű drónokra vagy személyszállító eVTOL-okra, mivel szolgálati magasságuk többnyire radar szint alatt



van, és szenzoraik révén nagyon kis földközeli magasságban képesek viszonylag gyorsan manőverezni, megnehezítve ezzel a vizuális és műszeres felderítésüket. Ezek a légi járművek fegyverek, robbanóanyagok szállítására vagy megfigyelésre is használhatók. Jó példa erre, hogy az ukrán hadsereg a jelenlegi katonai műveletekben is átalakított kínai mezőgazdasági drónokat használ fegyverek hordozására (9. ábra) vagy robbanószerek célba juttatására (10. ábra).



9. ábra

Fegyverek hordozására átalakított DJI AGRAS T30 mezőgazdasági drón [3]



10. ábra

Kis méretű bombák vagy aknagránátok hordozására átalakított mezőgazdasági drón [23]

Napjainkban már több személyszállító eVTOL a kereskedelemben is kapható. Ezek közül az egyik európai fejlesztés (11. ábra) már az USA-ban kezd elterjedni, mivel megkapta a szükséges engedélyeket FAA<sup>13</sup> PART103<sup>14</sup> alatt. A piaci trendeket elemezve nem kétséges, hogy a személyi (1-2 utas) eVTOL-ok száma a jövőben rohamosan szaporodni fog. Tömeges megjelenésük jelentős kihívás elé állítja integrálásukat a légi közlekedésbe.



11. ábra  
*Ultrakönnnyű eVTOL [22]*

Az ultrakönnnyű eVTOL-okon túl rohamlépésekkel folyik a szintén eVTOL és a drón kategóriákba tartozó „repülő autók” (12. ábra) fejlesztése. Ezek közül már több típus hamarosan kereskedelmi forgalomban is elérhető.

Jelentős mérföldkőhöz ért a kínai Xpeng AeroHT, amelynek tervezett kereskedelmi megjelenése 2026-ban várható. Megjelenése egy autóra emlékeztet, de valójában nincsenek kerekei.



12. ábra  
*Xpeng X2 repülő autó [11]*

<sup>13</sup> Federal Aviation Administration – Szövetségi Légügyi Hivatal.

<sup>14</sup> Ultrakönnnyű besorolás.

Ezzel ellentétben léteznek a mindennapokban megszokott autók repülni is tudó változatai [18], amelyek a közúti közlekedés mellett képesek a légtereket is igénybe venni. Ezek a járművek jelenleg még nem tekinthetők drónnak, de a levegőben közlekedve komoly problémákat okozhatnak a légterek felhasználóinak.

A személyszállító drónok a SmartCity AAM-konceptiójának jelentős részét képezik. A nem magáncélú felhasználáson túl kiemelt fontossággal kell kezelni a személyzet nélküli eVTOL-okra felszálló utasok ellenőrzését. Ez a repülőtereken lévő vertiportok (13. ábra) esetén egyszerűen megoldható, mivel az érkező utas a repülőgépből kiszállva „átsétál” a szintén a repülőtér területén található vertiporthoz, ahol már nem szükséges újabb biztonsági ellenőrzés, mivel már ellenőrzött területen tartózkodik.



13. ábra  
Vertiport a repülőtéren [1]

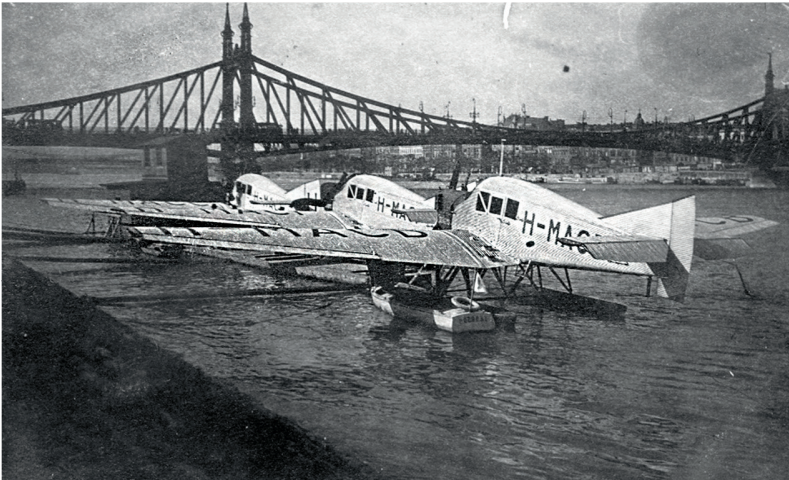
## 2.14. Biztonsági zónák kialakítása és az emberek védelme

Az EU 2019/947 rendelete a kockázatalapú teherviselésen alapszik ugyan, de a törvényhozók ezen a téren is jelentős lemaradásban vannak a technológiához képest. A személyszállító drónok útvonalát (amennyiben kereskedelmi szolgáltatást nyújtanak) jelenleg a „távol az emberektől és épületektől” elv alapján jelölik, dedikált útvonalon haladva, ami több-kevesebb sikerrel most még megoldható. De a SmartCity AAM koncepció lényege, az agglomeráció városközpontokkal való összekötése, amely már most is rendkívül nagy kockázatot jelent.

Jelenleg több személyszállító drón szolgáltatásokat nyújtó cég üzleti modellje arra épül, hogy a nagy nemzetközi repülőterekről gyorsan juttatja el az utasokat a városközpontokba. Ez jó és kifizetődő ötletnek tűnik, de van egy probléma: valamikor a városok peremére épített repülőtereket „benőtték” a városok. Ilyen körülmények között nehéz olyan útvonalat találni, amely ne jelentene kockázatot a földön lévőkre. A fenti probléma megoldására volt már példa a múltban is. Budapesten a múlt század első felében, a Szent Gellért tér közelében hidroplán kikötő üzemelt, (14. ábra) ahonnan az induló és érkező járatok többnyire a Duna felett közlekedtek. Hasonló megoldásként a drón légitaxi is követhetné az akkori koncepciót, már csak



azért is, mert ezeknek a drónoknak a fel- és leszállásához, vertikális manőverezhetőségüknek köszönhetően, nincs szükség a hagyományos légi járműveknél használatos futópályára, nagy mértékű eliminációra, zajgátló övezetek kialakítására stb. Az emberiség kezdete óta a városok, ahol csak lehet, folyók közelében épültek, majd a városközpontok is a folyók szomszédságában alakultak ki. Budapesthez hasonlóan, Londonban a Temze, Párizsban a Szajna, Berlinben a Spee és a többi hasonló nagyváros folyóinak légtere alkalmas lehet utas- vagy teherszállító drónműveletek végrehajtására. A következő probléma a folyók légtérébe való kijutás. Ezt leginkább autópályák nyomvonalán lehetne megoldani.



14. ábra  
Hidroplánkikötő Budapesten [25]

Ezt a koncepciót lehetne alkalmazni az utasszállító drónok esetén is. Például dróntaxik portjai Budapest központi részein, a Duna két partján helyezkednének el. A Férihegyről felszálló utasszállító drónok az M0 vonalát követve érhetnék el a Dunát, amely felett eljuthatnának a belvárosba. Ezen az útvonalon a művelet végrehajtása során nem, vagy alig lenne érintve lakott terület. A kérdés, hogy az ilyen megoldásoknál az adott légi jármű üzemanyag tekintetében elegendő vészhelyzeti tartalékkal rendelkezik-e? Ugyanis a jelenleg szóba jöhető típusok repülési ideje átlagosan 30 perc. Tehát kis kockázatú útvonalon az indulási és érkezési pontok közötti távolságnak 20 perc repülési időbe bele kell férnie.

Nézzünk néhány, a kereskedelmi műveletek engedélyezéséhez közel álló típust a repülési hatótávolságuk tükrében (1. táblázat).

1. táblázat  
A már sorozatgyártás előtt álló személyszállító dróntípusok [a szerző]

| Típus                  | Maximális repülési távolság |
|------------------------|-----------------------------|
| VoloCity               | 35 km                       |
| Ehang 216S             | 35 km                       |
| XPeng AeroHT Voyager 2 | 35 km                       |

### 3. Összegzés

A személyzet nélküli eVTOL légi járművek biztonsági kihívásai összetettek és sokrétűek, amelyek magukban foglalják a légi közlekedés biztonságát, az adatvédelmet, a kiberbiztonságot, valamint a szabályozási és jogi kérdéseket. A megfelelő szabályozási keretek, technológiai fejlesztések és operatív eljárások kialakítása alapvető fontosságú a drónok biztonságos és hatékony alkalmazásához.

#### Felhasznált irodalom

- [1] Vertiport a repülőtérén: [www.naco.nl/-/jssmedia/images/websites/naco/news-and-insights/news/naco-explores-opportunities-with-uap-for-vertiports-globally-new-h.jpg?mw=1680](http://www.naco.nl/-/jssmedia/images/websites/naco/news-and-insights/news/naco-explores-opportunities-with-uap-for-vertiports-globally-new-h.jpg?mw=1680)
- [2] Egy átlagos 2024-es mobiltelefon modell kamerái: [www.ajudandroid.com.br/wp-content/uploads/2023/01/galaxy-a14-5g-3.jpg](http://www.ajudandroid.com.br/wp-content/uploads/2023/01/galaxy-a14-5g-3.jpg)
- [3] Fegyverek hordozására átalakított DJI AGRAS T30 mezőgazdasági drón: [https://armyrecognition.com/images/stories/conflict/russia\\_invasion\\_ukraine/Ukraine\\_farm\\_drone\\_925\\_002.jpg](https://armyrecognition.com/images/stories/conflict/russia_invasion_ukraine/Ukraine_farm_drone_925_002.jpg)
- [4] A DJI ID-adatainak visszafejtése: <https://candid.technology/wp-content/uploads/2023/03/droneid-dji.jpg>
- [5] Elise Stefanik, *Gallagher Introduce Legislation to Counter Chinese Drones*. 2023. április 26. Online: <https://stefanik.house.gov/2023/4/stefanik-gallagher-introduce-legislation-to-counter-chinese-drones>
- [6] Európai Bizottság, A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról.
- [7] European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems.
- [8] European Commission, Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft.
- [9] G. Reim, „Pentagon Approves Five US Drone Makers Ahead of Likely Ban on China's DJI,” *Flightglobal.com*, 2020. augusztus 21. Online: [www.flightglobal.com/military-uavs/pentagon-approves-five-us-drone-makers-ahead-of-likely-ban-on-chinas-dji/139864.article](http://www.flightglobal.com/military-uavs/pentagon-approves-five-us-drone-makers-ahead-of-likely-ban-on-chinas-dji/139864.article)
- [10] France 24, „»Flying taxis« To Be Tested during Paris Olympics: Minister,” *France 24*, 2024. június 12. Online: [www.france24.com/en/live-news/20240612-flying-taxis-to-be-tested-during-paris-olympics-minister](http://www.france24.com/en/live-news/20240612-flying-taxis-to-be-tested-during-paris-olympics-minister)
- [11] Xpeng X2 repülő autó: <https://s-cdn.xpeng.com/xp-ams/2022-10-11/xp/12/0183c6e-fe041828c1f732c9e2975059a.jpg>
- [12] J. Basaez Serey, *HL-DRIP: A Blockchain-based Remote Drone ID Protocol Registry Management: Evaluation of a Hyperledger Fabric-based Solution to Manage DRIP Registries*. Linköping University, 2023.
- [13] KAV Vizsgaközpont, *KAVDíj táblázat*. [é. n.]. Online: <https://vizsgakozpont.hu/dijtablazat/dron-dijtablazat>

- [14] Közlekedési Hatóság, *Pilóta nélküli légijármű-irányítói igazolvány*. 2024. január 23. Online: <https://kozlekedesihatosag.kormany.hu/hu/dokumentumtar>
- [15] Fevétel készítése utasszállító drónból: [www.linkedin.com/posts/ehang-inc-\\_eh216-uae-aam-activity-7193609463512141824-XAYk](https://www.linkedin.com/posts/ehang-inc-_eh216-uae-aam-activity-7193609463512141824-XAYk)
- [16] 6/2021. (II. 5.) ITM rendelet a távoli pilóták képzését és vizsgáztatását végző szervezetek kijelöléséről, a távoli pilóták képzésének és vizsgáztatásának részletes szabályairól, valamint a vizsgán való részvétel díjáról
- [17] Egy hazai webshopban forgalmazott, osztályazonosító nélküli ázsiai drón: <https://hu.mormark.eu/app/uploads/2023/06/Mini-Drone-HD-Camera-Gallery-Img1-min.jpg>
- [18] Mester Gy., „Smart Mobility Solutions in Smart Cities,” *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 20. évf. 1. sz. pp. 37–43. 2022. Online: <https://doi.org/10.7906/indecs.20.1.5>
- [19] Ryzel DJI Tello Edu mini drón: <https://cdn.computerhoy.com/sites/navi.axelspringer.es/public/media/image/2024/02/ryze-tello-3277407.jpg?tf=1080x>
- [20] Egy világhírű német makettgyártó cég osztályazonosító nélkül forgalmazott drónja egy hazai német üzletláncban: <https://static.mueller.de/pdmain/4009803223810.webp>
- [21] A NASA jövőképe: [www.aviationtoday.com/wp-content/uploads/2021/03/aam-design3c-sm.jpg](https://www.aviationtoday.com/wp-content/uploads/2021/03/aam-design3c-sm.jpg)
- [22] Ultrakönnyű eVTOL: [https://jetson.com/\\_next/image?url=https%3A%2F%2Fimages.ctfassets.net%2Fcz59mqa3dcy%2F3FkexlkwTg6MqEMRbhleu%2Fc047c81f95ce7b-cedb84907483ee345e%2Fjetson\\_LaFilanda-00009\\_3\\_\\_hero\\_.jpg&w=3840&q=75](https://jetson.com/_next/image?url=https%3A%2F%2Fimages.ctfassets.net%2Fcz59mqa3dcy%2F3FkexlkwTg6MqEMRbhleu%2Fc047c81f95ce7b-cedb84907483ee345e%2Fjetson_LaFilanda-00009_3__hero_.jpg&w=3840&q=75)
- [23] Kis méretű bombák vagy aknagránátok hordozására átalakított mezőgazdasági drón: <https://static.kyivpost.com/storage/2024/04/16/783e020dbeeadeb1408022dc1697aa5e.jpg?w=900&q=90&f=webp>
- [24] A VoloCity bemutató repülése Párizs felett: <https://cdn.businesstraveller.com/wp-content/uploads/fly-images/1369820/VoloCity-flies-over-Paris-copy-916x515.jpg>
- [25] Hidroplánkikötő Budapesten: [https://fortepan.download/file/fortepan-eu/1600/fortepan\\_24829.jpg](https://fortepan.download/file/fortepan-eu/1600/fortepan_24829.jpg). Fotó adományozója: Weygand Tibor

---

## Safety Challenges for Unmanned eVTOL Aircraft

*In the coming years, with the emergence of smart cities, air mobility, including advanced air mobility, will be subject to revolutionary changes. With the development of technologies, new aircraft and their new applications have appeared. However, these developments have also brought new security challenges that cannot be addressed safely without them. The future safety challenges of air mobility will be comprehensively examined and, where possible, solutions are presented to ensure that new technologies and services are deployed in a safe and sustainable manner.*

**Keywords:** eVTOL, drone technology, urban aviation, security, advanced air mobility, smart city

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terpecz Gábor, MSc<br>tanársegéd<br>Óbudai Egyetem<br>Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar<br>Elektronikai és Kommunikációs<br>Rendszerek Intézet<br>Műszertechnikai és Automatizálási<br>Tanszék<br><a href="mailto:terpecz.gabor@uni-obuda.hu">terpecz.gabor@uni-obuda.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0001-7899-2837">orcid.org/0000-0001-7899-2837</a>                          | Gábor Terpecz, MSc<br>Assistant Lecturer<br>Óbuda University<br>Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering<br>Institute of Electronic and Communication<br>Systems<br>Department of Instrumentation and<br>Automation<br><a href="mailto:terpecz.gabor@uni-obuda.hu">terpecz.gabor@uni-obuda.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0001-7899-2837">orcid.org/0000-0001-7899-2837</a>                            |
| Dr. Schuster György<br>tanszékvezető, egyetemi docens<br>Óbudai Egyetem<br>Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar<br>Elektronikai és Kommunikációs<br>Rendszerek Intézet<br>Műszertechnikai és Automatizálási<br>Tanszék<br><a href="mailto:schuster.gyorgy@uni-obuda.hu">schuster.gyorgy@uni-obuda.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0002-8573-3670">orcid.org/0000-0002-8573-3670</a> | György Schuster, PhD<br>Head of Department, Associate Professor<br>Óbuda University<br>Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering<br>Institute of Electronic and Communication<br>Systems<br>Department of Instrumentation and<br>Automation<br><a href="mailto:schuster.gyorgy@uni-obuda.hu">schuster.gyorgy@uni-obuda.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0002-8573-3670">orcid.org/0000-0002-8573-3670</a> |



László Gajdács

## The Potential Flight Safety Risks Associated with Unmanned Aerial Vehicles and the Importance of Ensuring their Visibility

*In recent decades, the airspace has become increasingly congested due to the exponential growth in air traffic. Furthermore, the advent of unmanned aerial vehicles (UAVs) has introduced a new dimension to aviation safety. The integration of UAVs into the traditional aviation system presents a multitude of challenges, necessitating the development of appropriate legal regulations, innovative technical solutions, and the implementation of special procedures to mitigate flight safety risks. With the advent of sophisticated systems and equipment, even small UAVs can be effectively monitored and tracked during flight. This enables the immediate and indirect environment surrounding the UAV to be identified, enhancing situational awareness and reducing the risk of collisions. Such solutions include various existing identification systems, such as FLARM,<sup>1</sup> OGN,<sup>2</sup> ADS-B<sup>3</sup> and Remote ID.<sup>4</sup> Additionally, special lighting systems on board drones can be employed as a solution, particularly for visual recognition and identification. By utilising these systems, visual surveillance can be extended, and drones can be more easily detected by their surroundings. The simultaneous use of the aforementioned solutions can further enhance the safe integration of drones in traditional traffic [1].*

**Keywords:** drones, flight safety, risk, FLARM, ADS-B, OGN, Remote ID

### 1. Introduction

In the field of aviation, it is of vital importance to adhere to the principle of maintaining visibility and awareness in order to ensure flight safety. This principle has been developed over the past decades through a series of research and development activities, with the objective of ensuring that different types of aircraft are "visible" to other aircraft in the airspace and to air traffic services.

Unmanned aircraft are defined as "flying robots" that exhibit a range of characteristics, including varying weights, designs, and purposes of use [12], [13]. In essence, there are three principal methods of control: manual mode, in which the drone operator directly controls

<sup>1</sup> Flight Alarm.

<sup>2</sup> Open Glider Network.

<sup>3</sup> Automatic Dependent Surveillance-Broadcast.

<sup>4</sup> Digital Registration Number of Drones.

the aircraft and maintains constant, direct contact with it; autonomous mode, in which the drone is programmed to navigate a pre-defined route without human intervention; and remote control mode, in which the operator controls the aircraft from a distance. The other mode is autonomous mode, in which the drone is capable of navigating a pre-programmed route without the need for human intervention [17]. The third mode is the combined mode, which permits the drone to undertake certain phases of the flight without human intervention, such as landing or take-off, while allowing it to operate autonomously in other respects [11]. All three modes may be flown in visual line of sight (VLOS) or beyond visual line of sight (BVLOS). The latter represents a significantly greater risk, as the device may be several kilometres away from the operator.

## 2. The role of flight safety in the utilisation of drones

A significant challenge in the design, ground and airborne operation of an unmanned aerial system (UAS) is ensuring flight safety and general safety [18], [20]. The operation of aircraft (including drones) and the safety of flights depend on reliability. Unlike traditional aircraft maintenance processes, unmanned aircraft maintenance personnel need to be familiar with the system as a whole, so reliability must cover the whole spectrum of the UAV, from the ground station to the communication equipment [19].

Conscious or "law-abiding operator behaviour" requires that those who fall into this user group are aware of the legislation that applies to them and the equipment they are using. Conscious behaviour can prevent potential damage to various personal and material assets.

In the context of unmanned aircraft operations, there are three main situations that should be avoided:

- a dangerous approach to another aircraft, which could result in a near miss or Airprox;<sup>5</sup>
- the causing of harm to people;
- of damage to property (including the various infrastructures) [2], [15].

### 2.1. The significance of safety in conventional air transport

Aviation safety can be defined as the management of aviation risk in practice. Aviation safety is a complex and multifaceted field, with each of its components serving a single objective: to avoid or minimise the number of aviation incidents or accidents. The effective operation of this system is governed by a combination of national and international legislation [3].

One of the primary objectives of the ICAO<sup>6</sup> is to reduce the number of fatal air disasters to zero by 2030. The objective is to achieve this through the intervention of some 193 countries. The common (international) rules serve as the foundation of aviation safety systems. They establish uniform requirements for operators, manufacturers and aircrew alike [4].

<sup>5</sup> Aircraft Proximity – Another Aircraft Dangerous Approach.

<sup>6</sup> International Civil Aviation Organization.

The factors affecting aviation safety can be divided into three groups:

*a) Objective factors:*

- This encompasses factors that directly or indirectly impact aviation without the involvement of humans, such as material factors (aeronautical engineering) and

*b) Subjective factors:*

- This category encompasses human factors that may contribute to either a positive or negative change in aviation safety, to a lesser or greater extent.

*c) Hidden or undisclosed factors:*

- These are factors that, in many cases, cannot be identified in advance and are therefore almost impossible to predict. Consequently, the identification of these factors is unlikely to occur during the development of a potential aviation incident [5].

## *2.2. The significance of ensuring the safety of flight when utilising unmanned aircraft vehicles*

The integration of unmanned aircraft into “conventional” aviation is still ongoing. In order to achieve this successfully and safely, there are three main objectives that must be met:

- it is of utmost importance that unmanned aircraft do not endanger other airspace users;
- furthermore, the ATM<sup>7</sup> procedures should mirror those applicable to drones;
- finally, air traffic services to unmanned aircraft should be transparent for ATC<sup>8</sup> controllers [5].

The utilisation of drones is associated with a multitude of potential safety hazards. It is of utmost importance to be aware of the potential risks associated with the use of drones, as any of them can occur during flight. Additionally, a number of hazards must be anticipated during the planning and execution phases of a drone flight, as well as during the flight itself. These include:

- inadequate pre-flight preparation, task planning;
- air traffic (other aircraft in the airspace);
- collision with another drone and/or piloted aircraft;
- weather conditions (high winds, gusts);
- human resources (required qualification, passing of examinations);
- lack of practical skill (little practical flying experience);
- occurrence of technical failures (electric motor failure, loss of drone control, etc.);
- changes in the flight environment (risk of possible collision with natural or artificial terrain);
- inappropriate choice of flight environment (obstacle environment);
- intentional drone interference, etc.

<sup>7</sup> Air Traffic Management.

<sup>8</sup> Air Traffic Control.

In order to be adequately prepared for potential risks, it is first necessary to be able to recognise the risk in question (see Figure 1).

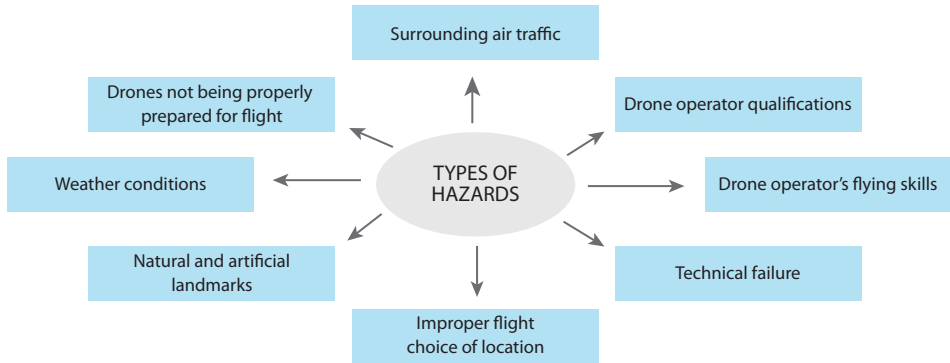


Figure 1.  
*Types of hazards associated with unmanned aircraft* [the author]

What are risks? They are factors or circumstances that could lead to an accident. In aviation, these hazards can be obvious or hidden.

Knowledge of the various sources of hazards is not in itself sufficient to ensure safety. We need to know the magnitude and severity of the potential hazard, but also the likelihood of it occurring. Knowing the severity and the value of the probability of the event occurring enables us to manage the risk [9].

### 2.3. The role of the UAS safety risk assessment process

As in conventional aviation, the operation of unmanned aircraft is expected to be conducted in an optimal manner with regard to safety. A safety risk assessment can assist in the identification of potential safety hazards of varying severity and probability (frequency) that may arise during operations, along with the formulation of proposals and measures to mitigate them. The process is depicted in Figure 2.



Figure 2.  
*The process of risk assessment* [6]

The security risk assessment process is comprised of four sub-processes:

- the assessment and identification of security threats;
- the undertaking of a risk assessment;
- the implementation of measures to mitigate potential risks;
- the documentation of risk assessment results.

The identification of potential hazards and factors that could affect aviation safety is a fundamental aspect of the identification process. The risk assessment determines the severity of the factors identified as hazards and their likelihood of occurrence. In order to reduce the potential risks, risk mitigation measures are identified. Finally, at the conclusion of the risk assessment process, a comprehensive documentation will be generated to validate the entire process from its inception to its conclusion [6].

### 3. The forms of unmanned aircraft detection and visibility implementations

The detection of unmanned aircraft can be achieved in a number of basic ways. Such aircraft can be detected by conventional radar systems. However, the efficacy of this approach is contingent upon a number of factors, including the dimensions of the aircraft to be identified, its structural composition, and other characteristics.

Furthermore, it is possible to detect them via on-board radiating devices (which can be transmitters or transceivers). These devices serve the basic function of providing information on the aircraft's position, altitude and planned course. Furthermore, the use of on-board lighting systems can also be employed to enhance their visibility.

Information regarding the detection and/or tracking of aircraft can be obtained through a variety of channels. An illustration of this phenomenon is presented in Figure 3.

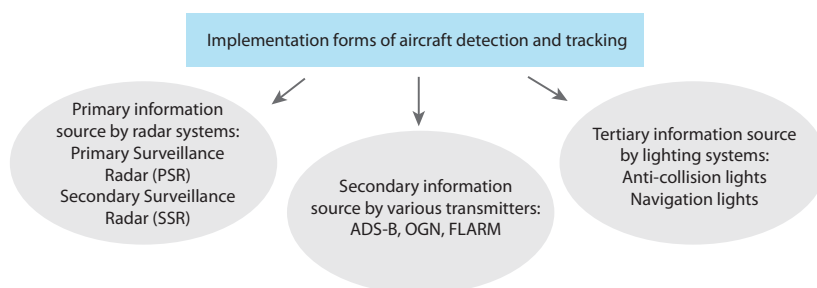


Figure 3.

*Potential sources of information for the detection of aircraft (the author based on [1])*

The objective of the data from the various sources is to provide as much information as possible about the spatial position of air transport users.

#### 3.1. Primary source of information on unmanned aircraft

It is also possible to detect aircraft using conventional radar systems. However, the issue of their effective deployment is that drones have a considerably smaller size and therefore a smaller reflective surface than conventional aircraft. This prompts the question of the efficacy of obtaining information about them. A schematic of the radar measurement process is presented in Figure 4.

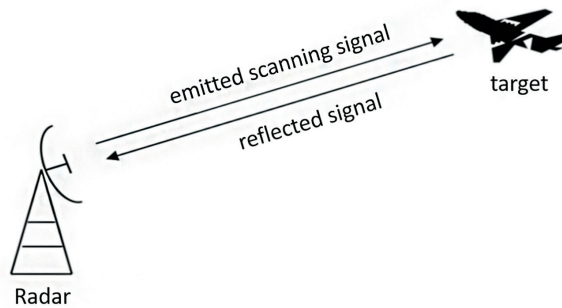


Figure 4.  
Theoretical overview of radar measurement [14]

In the context of radar systems, it is possible to distinguish between active and passive radars. An active system is defined by the fact that the electromagnetic signal is emitted by the radar itself via a transmitter. In contrast to the active system, the passive system does not emit the illuminating signal required for target detection; instead, it utilises the signal sources in the target's environment for detection. The illuminating signals originate from transmitters associated with broadcasting or telecommunication systems. The aforementioned transmitters are referred to as illumination sources in the context of passive radar systems [14].

### 3.2. Secondary sources of information on unmanned aircraft

Flight and position data derived from secondary sources may be derived from the utilisation of the following system:

- FLARM;
- OGN;
- ADS-B;
- Remote ID.<sup>9</sup>

#### 3.2.1. FLARM system

FLARM (Flight & Alarm) system is a technical solution designed to monitor air traffic and prevent collisions. The system was initially developed for glider pilots with the objective of preventing collisions in the air. Currently, approximately 50 000 conventional aircraft worldwide utilise this technology.

However, there is a type of FLARM system specifically designed for unmanned aerial vehicles (FLARM ATOM and FLARM AURORA), which also aims to provide a solution for drones to be seen and tracked during their flight (see Figure 5).

<sup>9</sup> Drone identification unit.

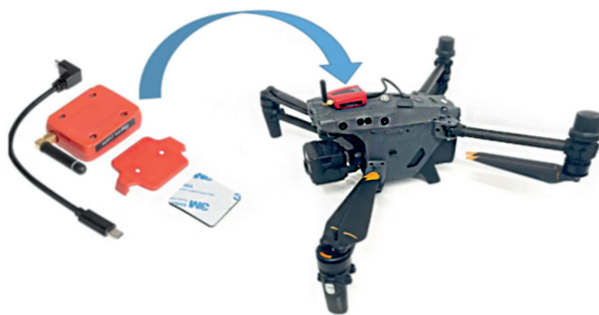


Figure 5.  
FLARM Aurora modul [7]

The Aurora module, depicted in Figure 5, is also suitable for the transmission and broadcasting of the various types of data required by remote identification systems. The product is the smallest size transmitter available from the manufacturer, which has been specifically designed for unmanned aircraft.

### 3.2.2. Open Glider Network

The OGN system, similar to the FLARM system previously discussed, is designed to provide a solution for both piloted and unmanned aircraft, ensuring that those utilising the system are visible to their surroundings. The OGN system has been developed based on the FLARM system, and it currently has in excess of 20 000 registered users. The system's architectural framework is depicted in Figure 6.

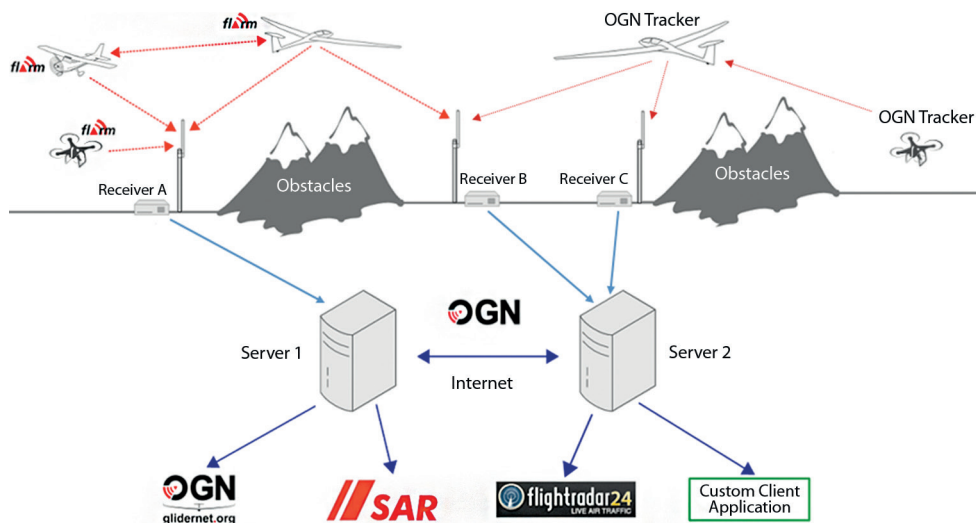


Figure 6.  
Structure of the OGN system [16]



The following elements are integral to the functioning of the OGN system:

- OGN receiving stations (ground stations);
- on-board OGN transmitters (trackers);
- Automatic Packet Reporting System (APRS) Linux-based servers (receiving and sending data);
- websites and applications capable of processing and/or displaying data;
- human segment who use the system and the developers.

### 3.2.3. ADS-B system

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) is a sophisticated transceiver system. The system is designed to identify and track aircraft in flight for both airspace users and ground control units (Figure 7).

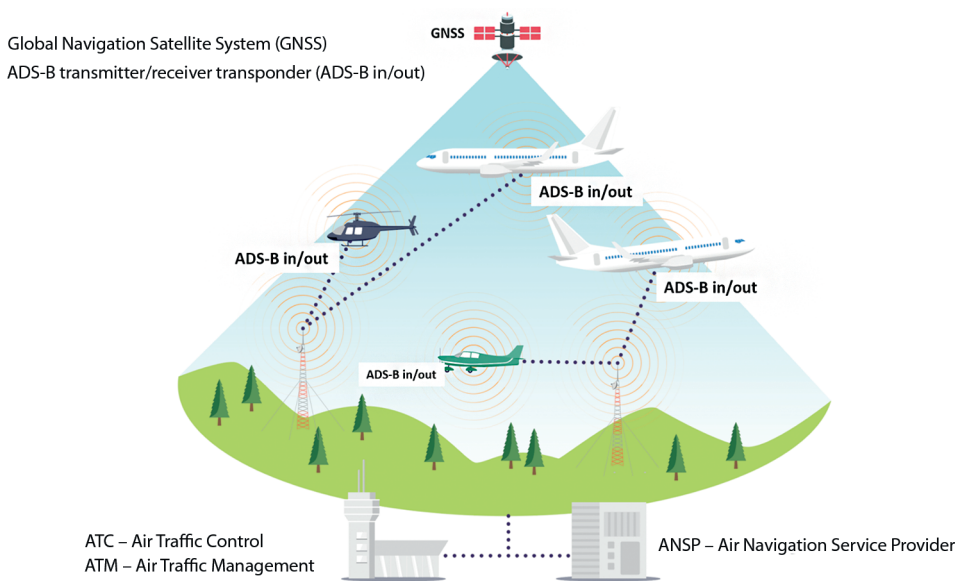


Figure 7.  
ADS-B system architecture [8]

There are three main versions of ADS-B transceivers:

- ADS-B Out: capable of transmitting data to traffic control and aircraft;
- ADS-B In: capable of receiving position data from other aircraft;
- ADS-B In & Out: capable of sending and receiving its own data.

### 3.2.4. Remote ID

The Remote ID system was developed with the intention of enabling the identification of drones. It is currently still under development. It is, in essence, an identification data plate for the digital license plate of a drone. The purpose of the ID system is to facilitate remote identification of drones, including by authorities. This is done by transmitting data, as shown in Figure 8.

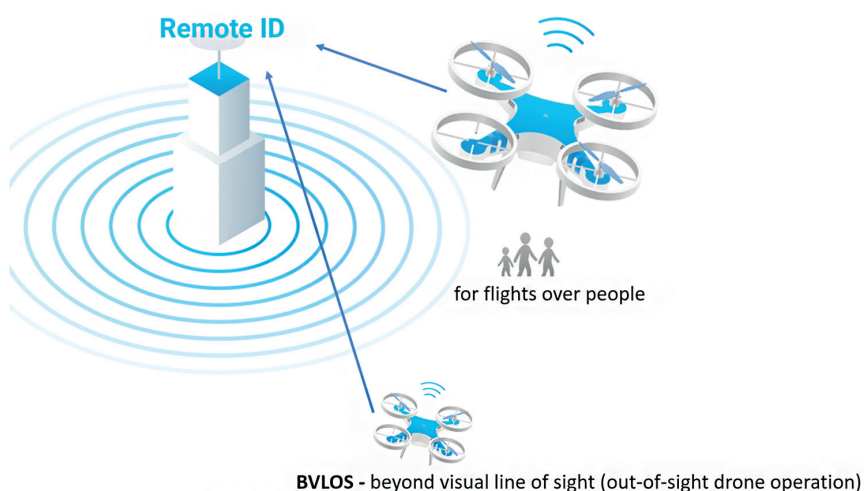


Figure 8.  
Remote ID application overview [10]

In the European Union, the remote identification requirements, based on and largely applying FAA guidelines, require on-board transmitters to transmit the following data from the drone:

- the drone's unique serial number;
- the drone's registration number;
- the drone's geographic position and altitude relative to the location or take-off point;
- the drone's direction of travel and speed;
- geolocation of the operator or take-off point, etc.

### 3.3. A tertiary information source for unmanned aircraft

The third source of information is provided by the various navigation and anti-collision light sources installed on board unmanned aircraft. However, the regulations governing night operations are essentially universal. The use of drones is not exclusively limited to night-time operations; there is a greater need for them to be clearly visible in the sky during the day, irrespective of weather conditions. The application of "warning" lights, namely anti-collision lights, would reduce near miss to other aircraft and reduce the likelihood of potential collisions.

The functions and types of light sources on board unmanned aircraft are presented in Figure 9.

1. orientation, navigation function;
2. mode and system status indication function:
  - flight mode indication (P-mode, S-mode, A-mode);
  - low battery level;
  - data link between the drone and its remote control;
  - Return to Home Point (RTH) activation;
  - need for compass calibration;
  - Inertial Measurement Unit (IMU) failure, etc.
3. collision avoidance support function;
4. other additional functions [21].



Figure 9.

*A functional classification of on-board lighting systems for drones, as proposed [the author]*

Currently, the majority of drones are equipped with on-board functions indicating mode and system status, as well as navigation lights. However, there is a growing need for collision avoidance lights. It is recommended that these features be incorporated into the drone during

## 4. Conclusion

As with conventional aviation, safety is a primary concern in the operation of unmanned aircraft. To ensure this, it is essential to adhere to the established framework of rules governing drone operations. Periodic reviews and amendments to these rules are necessary to maintain safety standards. Information on the position of aircraft can be obtained through various channels and systems, which are crucial for the safe transportation of airborne vehicles. Increasing the visibility of drones could be a potential solution to enhance flight safety.

## References

- [1] Gajdács L., "Látni és láthatóvá válni megoldások drónokhoz," *Hadmérnök*, Vol. 18, no. 4, pp. 5–17. 2023. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2023.4.1>
- [2] EASA, *Concept of Operations for Drones, A Risk Based Approach to Regulation of Unmanned Aircraft*. EASA Brochure, 29 May 2015. Online: [www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/concept-operations-drones](http://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/concept-operations-drones)
- [3] Wikipedia, *Aviation safety*. [s. a.]. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aviation\\_safety](https://en.wikipedia.org/wiki/Aviation_safety)
- [4] ICAO, *Safety News*. [s. a.]. Online: [www.icao.int/safety/Pages/default.aspx](http://www.icao.int/safety/Pages/default.aspx)
- [5] Gajdács L., Palik M., Dudás Z., "Drónok és hagyományos légi járművek közös légtérben történő alkalmazásának repülésbiztonsági kockázatai," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 33, no. 1, pp. 157–170. 2021. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.12>
- [6] J. Ferrigan, *Safety Risk Assessment for UAV Operation*. AeroTract Geospatial, April 2022.
- [7] Airclip.de, *Flarm Module Aurora*. [s. a.]. Online: [www.airclip.de/FLARM-module-Aurora](http://www.airclip.de/FLARM-module-Aurora)
- [8] ADS-B, *Introduction to ADS-B*. [s. a.]. Online: <https://ads-b.aviation.govt.nz/introduction/#how-does-ads-b-work>
- [9] Dudás Z., "Repülésbiztonsági veszélyek és kockázatok," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 15, no. 2, pp. 1–6. 2003. Online: [www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2003\\_cikkek/dudas\\_zoltan.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2003_cikkek/dudas_zoltan.pdf)
- [10] Elsieht, *Compliance with FAA Remote ID Regulations*. White Paper, 2022. Online: [https://lp.elsieght.com/hubfs/Remote\\_ID\\_White\\_Paper-1.pdf](https://lp.elsieght.com/hubfs/Remote_ID_White_Paper-1.pdf)
- [11] Gajdács L., Major G., "Az UAV alkalmazásának kockázatai a biztonságtechnika területén," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 30, no. 2, pp. 101–112. 2018. Online: [www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018\\_2/2018-2-09-0497\\_Major\\_Gabor-Gajdacs\\_Laszlo.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-09-0497_Major_Gabor-Gajdacs_Laszlo.pdf)
- [12] Békési B., Szilvássy L., Major G., Gajdács L., Jámbor K., "Munkadrónok egy modern légikikötő mindennapjaiban," *Honvédségi Szemle*, Vol. 151, no. 3, pp. 27–41. 2023. Online: <https://doi.org/10.35926/HSZ.2023.3.3>
- [13] B. Békési, L. Szilvássy, G. Major, L. Gajdács, K. Jámbor, "Working Drones in a Modern Airport's Daily Life," in *Transport Means 2022 Sustainability: Research and Solutions, Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Scientific Conference: Part II*, Ed., Ostaševičius, V., Kaunas: Leidykla Technologija, 2022, pp. 836–841.
- [14] Gajdács L., "Pilóta nélküli légi jármű érzékelésének lehetséges megoldásai," *Hadmérnök*, Vol. 17, no. 4, pp. 17–28. 2022. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2022.4.2>
- [15] International Civil Aviation Organization, *Doc 4444 ATM/501 Air Traffic Management*. Fifteenth Edition, 2007.
- [16] The Open Glider Network's official website. Online: [www.glidernet.org/](http://www.glidernet.org/)
- [17] M. Palik, G. Pongrácz, "Communication Issues of UAV Integration into Non Segregated Airspace," *Defense Resources Management in the 21<sup>st</sup> Century*, Brasov, Romanian National Defense University, Regional Department of Defense Resources Management Studies, 2012, pp. 69–74.
- [18] Békési B., Major G., "A drónok konfigurációi, alkalmazási területei," in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2022: Konferenciakiadvány*, Nyíregyháza, 2022. 06. 02. (Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, Magyar Tudományos Akadémia [MTA] Debreceni Területi Bizottság [DAB] Műszaki Szakbizottsága), Páy G. Ed., Nyíregyháza, Magyarország: Nyíregyházi Egyetem, 2022, pp. 301–307.

- [19] Békési B., Papp I., Szegedi P., "UAV-k légi és földi üzemeltetése," *Economica*, Vol. 6, no. 2, pp. 99–117. 2013. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4422>
- [20] Békési B., Novák M., Kárpáti A., Zsigmond Gy., "Investigation of the Reliability of UAVs," *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference Transport Means 2012*. Kaunas, Lithuania, 2012, pp. 101–103.
- [21] Gajdács L., "A drónok vizuális láthatóságának jelentősége," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 35, no. 2, pp. 157–168. 2023. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2023.2.17>

## **Pilóta nélküli légi járművek repülésbiztonsági kockázatai, láthatóságuk jelentősége**

Napjainkban egyre zsúfoltabb a légtér a növekvő számú légi forgalom miatt. Emellett az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb számban jelennek meg a pilóta nélküli légi járművek is. Integrálásuk a hagyományos légi közlekedési rendszerbe számos kihívást fogalmaz meg. A repülésbiztonsági kockázatok csökkentésére megfelelő jogi szabályozásra, új műszaki megoldásokra és speciális eljárások kombinált alkalmazására van szükség. Különböző rendszerek és berendezések segítségével a kis méretű drónok is megfigyelhetővé válnak repülésük folyamán a közvetlen és a közvetett környezetük számára egyaránt. Ilyen megoldások a már meglévő különféle azonosító rendszerek, mint a FLARM, az OGN, az ADS-B és a Remote ID. Továbbá megoldást jelenthetnek – elsősorban a vizuális felismerés és azonosítás érdekében – a drónok fedélzetén elhelyezett speciális fénytechnikai rendszerek is. Ezek használatával kiterjeszthető a vizuális megfigyelés, könnyebben észlelhetők a drónok a környezetük számára. A fenti megoldások egyidejű használata tovább javíthatja a drónok biztonságos integrálását a hagyományos forgalomba [1].

**Kulcsszavak:** drónok, repülésbiztonság, kockázat, FLARM, ADS-B, OGN, Remote ID

Gajdács László  
százados, tanársegéd, PhD-hallgató  
Nemzeti Közszerológati Egyetem  
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék  
[gajdacs.laszlo@uni-nke.hu](mailto:gajdacs.laszlo@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0003-2334-6859](https://orcid.org/0000-0003-2334-6859)

László Gajdács, MSc  
Captain, Assistant Lecturer, PhD student  
Ludovika University of Public Service  
Faculty of Military Science and Officer Training  
Department of Aircraft Onboard Systems  
[gajdacs.laszlo@uni-nke.hu](mailto:gajdacs.laszlo@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0003-2334-6859](https://orcid.org/0000-0003-2334-6859)

TKP2021-NVA-16 has been implemented with the support provided by the Ministry of Culture and Innovation of Hungary from the National Research, Development and Innovation Fund, financed under the TKP2021-NVA funding scheme.



Major Gábor, Albert Csongor

## A rádiólokáció fejlődéstörténete és napjainkban betöltött szerepe

*A rádióhullámok felfedezése és felhasználása óriási technológiai lehetőségnek bizonyult az emberek kezében. A rádióhullámok reflektálódásának segítségével meg tudjuk határozni különböző tárgyak helyzetét. Ebben a publikációban e találmány, nevén nevezve a radar<sup>1</sup> fejlődéstörténetének folyamatát szeretnénk a megjelenésének első pillanatától napjainkig vizsgálni. A radarrendszerek fejlődése a hadiipar bemutatásának egyik fontos alappillére, a másik pillér a civil légi közlekedés biztonságosságának és hatékonyságának állandó növelése. Ezek a radarrendszerek napjainkban is állandó fejlődésen mennek keresztül a kapcsolódó új technológiai vívmányoknak köszönhetően.*

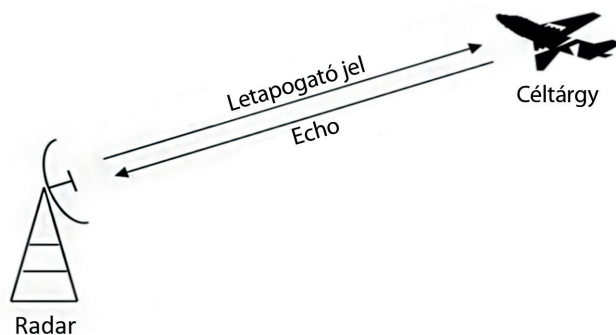
**Kulcsszavak:** radar, lokátor, rádiófelderítés, fejlesztés, észlelés, pontosság, rádióhullám, antenna

### 1. Bevezetés

A rádiólokáció a tárgyak vagy objektumok távolságának és helyzetének meghatározását az elektromágneses hullámok használatával teszi lehetővé. Az elektromágneses hullámok térben való terjedése során áthaladva az atmoszférán ütköznek a hullámhosszával összemérhető kiterjedésű szilárd testekkel. Amikor ezek a hullámok találkoznak egy tárggyal vagy objektummal, egy részük visszaverődik, visszatérve az eredeti forrás irányába (1. ábra). A rádiólokációs rendszerek ezt a visszavert jelet érzékelik, és felhasználják az objektumok helyzetének és távolságának meghatározására [9], [24].

Az érzékelők által kapott jeleket feldolgozzák és értelmezik a rendszerbe épített algoritmusok segítségével. Ezek a szoftverek megállapítják az objektum távolságát, irányszögét ezáltal a helyzetét, a kijelzőn pedig megjelenítik ezeket az információkat a felhasználó számára. Az idő vagy a fázis különbségét használják fel a visszavert jelek érzékelésére és az objektumok távolságának meghatározására. Ha ismerjük a küldött és a visszavert jel közötti időeltérést, vagy fáziskülönbséget, akkor meghatározhatjuk az objektum távolságát és helyzetét [9], [24].

<sup>1</sup> A radar egy olyan rendszer, amely rádióhullámok segítségével érzékeli és lokalizálja a tárgyakat. Működése során rádióhullámokat sugároz, és érzékeli a környezetben lévő tárgyakról visszaverődő visszhangokat. A radarrendszereket általában a repülésben, a navigációban és az időjárás-előrejelzésben használják.



1. ábra  
A radar működésének alapelve [19]

A rádiólokáció felhasználásának számos alkalmazási területe van, beleértve a légi közlekedést, a hajózást, a járművek automatizált navigációját, a térképezést és helymeghatározást, a térfigyelést és a katonai alkalmazásokat (mint például az elektronikai támogató tevékenység, az elektronikai ellentevékenység és az elektronikai védelem [14]). A technológia folyamatos fejlődése és alkalmazásainak növekedése új lehetőségeket nyit meg a rádiólokáció területén, ami további innovációkat és fejlesztéseket eredményezhet a jövőben [8].

## 2. A rádiólokáció fejlődéstörténete

A rádiólokáció fejlesztésének története hosszú múltra tekint vissza, még a világháború előtti évekre. Már a 19. században fontos fejlesztések folytak a rádióhullámok megismerésére, és azóta is gyorsan fejlődő terület a hétköznapi felhasználás és a tudományok világában [12], [23].

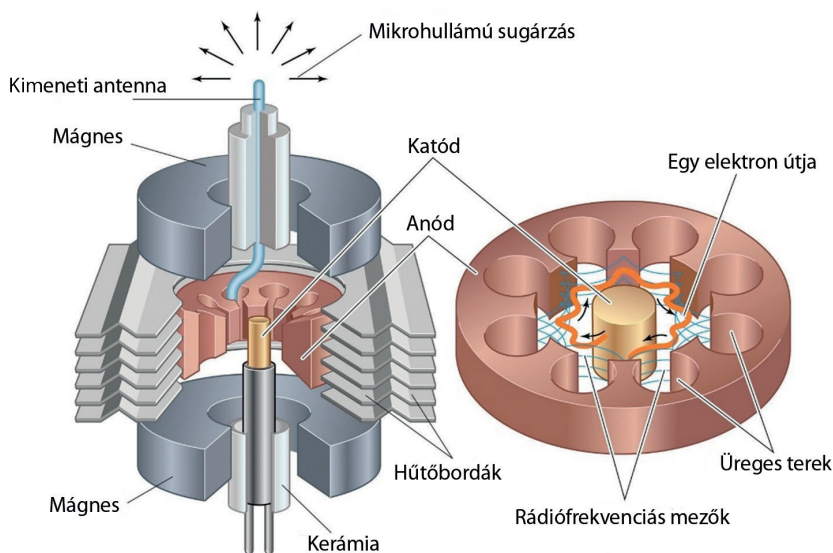
### 2.1. Kezdeti időszak

A rádiólokációs elvek megértésében az első jelentős lépés a 19. század végén és a 20. század elején volt tapasztalható. Ekkor a tudósok felfedezték az elektromágneses hullámok létezését elméleti úton, majd ezt kísérletekkel bizonyították is. Ez a hullámok terjedésében és reflexiózásában mutatkozott meg, amit elsősorban fémes tárgyakon próbáltak, így ezáltal a távolságmérésben rejlő esetleges potenciál lehetősége adódott [12], [23].

Az első jelentős mérőföldkövek a rádiólokáció területén a rádiótechnika mint műszaki terület kialakulásával kezdődtek a 20. század elején. A rádióadók és -vevők kifejlesztése lehetővé tette az elektromágneses hullámok észlelését és megfigyelését a mérnökök számára és azok visszaverődésének érzékelését a vevő antenna által [12], [23].



Albert Wallace Hull<sup>2</sup> 1924-ben találta fel a magnetront (2. ábra), azt az elektroncsövet, amely megfelelő hatásokkal képes nagy teljesítmény kibocsátására, nagyfrekvenciás jelek formájában [23].



2. ábra  
A magnetron felépítése [4]

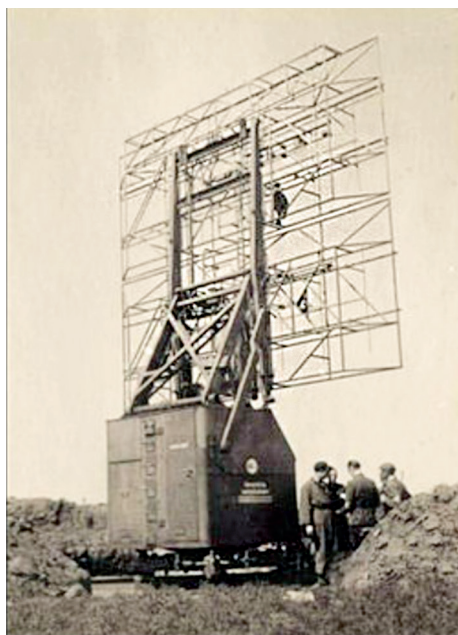
Az elsőként alkalmazott rádiólokációs rendszerek között szerepelt az úgynevezett RDF<sup>3</sup>-rendszer, amelyet a hajózásban használtak az irány meghatározására, különösen rossz időjárási körülmények között. Az ezen alapuló eszközök azonban még nem voltak képesek pontosan meghatározni a távolságot vagy a tárgyak pontos pozícióját [12], [23].

## 2.2. A II. világháború és az azt megelőző időszak

A II. világháború előtti években a rádiólokáció fejlesztése gyorsulni kezdett, különösen a katonai légvédelmi célokra történő hadipari fejlesztések terén. A radartechnológia létrehozása és elterjedése az egyik jelentős fejlesztési irány ebben az időszakban. A légvédelmi radarrendszerek lehetővé tették a repülőgépek és más légi járművek detektálását, követését és azonosítását, ez jelentősen hozzájárult a sikeres légtérvédelemhez. E technológiák fejlesztését az országok szigorúan titkosnak tekintették, mivel úgy vélték, hogy a közelgő háborúban jelentős előnyt fog jelenteni számukra [12], [23].

<sup>2</sup> Albert Wallace Hull (1880. április 19. – 1966. január 22.) amerikai fizikus és villamosmérnök, aki hozzájárult a vákuumcsövek kifejlesztéséhez, és feltalálta a magnetront.

<sup>3</sup> Direction Finding – iránymérés (DF), Radio Direction Finding – rádióiránykeresés (RDF), rádióhullámok használata a rádióforrás irányának meghatározására.



3. ábra

*Egy korabeli radarantenna a II. világháború időszakából [12]*

Az első katonai ütközet, amelyben éles radarrendszert alkalmaztak az az angliai csata volt, ahol a britek a szigetország déli részére antennahálózatot építettek, amelynek neve „Chain Home”<sup>4</sup> volt (3. ábra). Ez a kezdetleges radarrendszer antennatornyokon alapult, emiatt helyhez kötött volt. A rendszer alkalmazásával a Royal Air Force<sup>5</sup> sikeresen tudott védekezni a német bombázók támadásai ellen. Miután a német pilóták rájöttek, hogy kapcsolat van a RAF sikeres védekezése és az antennatornyok között, jelentős célokká minősítették azokat. A világháború végére már Németország is rendelkezett sikeresen alkalmazható radartechnológiával, amely jelentősen pontosabb volt, mint az antanthatalmak<sup>6</sup> által használt berendezések [12].

A radarfejlesztések később a II. világháborúban kulcsfontosságú szerepet játszottak az ellenséges csapások megelőzésében és elhárításában. A radarok nagyban hozzájárultak az ellenséges erők bombázóinak felderítéséhez és megsemmisítéséhez, valamint a tengeri csaták kimenetelében is szerepet játszottak [12], [23].

<sup>4</sup> Chain Home vagy röviden CH volt a kódneve azoknak a part menti korai előrejelző radarállomásoknak, amelyeket a Királyi Légierő (RAF) épített a II. világháború előtt és alatt a repülőgépek észlelésére és követésére. Eredetileg RDF néven ismerték, és 1940-ben az Air Ministry Experimental Station Type 1 (AMES – Légiügyi Minisztérium Kísérleti Állomás) hivatalos nevet kapta.

<sup>5</sup> A brit Királyi Légierő (angolul Royal Air Force, RAF, jelentése „Királyi Légierő”).

<sup>6</sup> Az antant kifejezés az Anglia és Franciaország között 1904. április 8-án Londonban aláírt szerződés, az Entente cordiale (szívélyes egyetértés) kifejezésből származik, és általában a szövetségi rendszer (antanthatalmak = Nagy-Britannia és Franciaország) és a körükbe csoportosult országok együttes jellemzésére használjuk.

### 2.3. Hidegháború

A hidegháború ideje alatt a radarok fejlesztése és precizítása továbbra is kulcsszerepet játszott a katonai stratégiában és a légtér védelmében. Az Egyesült Államok és a Szovjetunió közötti feszültségek miatt mindkét fél jelentős erőforrásokat fektetett a radarfejlesztésbe és azok alkalmazásába [3], [11], [29].

A legfontosabb alkalmazási terület a légi és űrfelderítés volt. A radarrendszerek lehetővé tették a légtérsértés felderítését, továbbá jelentős szerepet játszottak a légtér ellenőrzésében és a légi közlekedés biztosításában. Az űrfelderítés és az űrkutatás is fontos helyet foglalt el a hidegháborús űrversenyben, segítve a műholdak követését és az űrben történő események megfigyelését [3], [29].

Emellett a radarok fontos szerepet játszottak a nagy hatótávolságú rakétavédelemben is. Mindkét fél nagyobb mennyiségű ballisztikus rakétát és interkontinentális ballisztikus rakétát fejlesztett, amelyeket gyakran nukleáris fejjel láttak el, amelyek rendkívüli fenyegetést jelentettek a hidegháború során. A radarok segítettek a rakéták detektálásában és nyomon követésében, lehetővé tették a lehetséges korai riasztást és a védelmi intézkedések meghozatalát [3], [11], [29].

### 2.4. A radarok civil felhasználása a II. világháború után

Az 1950-es évektől kezdve a radarok nemcsak a katonai szférában, hanem a civil felhasználásban is jelentős fejlődésen mentek keresztül. Ennek köszönhetően egyre szélesebb körben kezdték alkalmazni. Ezzel egy időben megjelent a másodlagos radar fogalma is. Ebben az időszakban az egyik legjelentősebb alkalmazási területté nőtte ki magát a légiforgalom-irányítás, ahol jelentős volt a térhódítása a másodlagos radarnak. Mivel ebben az esetben nem a rádióhullámok reflektálásának érzékelésén alapult a felderítés, hanem egy kérdés és a rá adott válasz kisugárzásán és fogadásán, ezért óriási mennyiségű energia megspórolása mellett több információt is megtudhattunk a másodlagos radar által az észlelt légi járműről [7], [16].

A mind szélesebb körben és mindinkább forszírozott használat során 1941-ben rájöttek, hogy a radarindikátoron nemcsak a fémes tárgyak jelennek meg, hanem a zivatarfelhők is. Az amerikaiak már 1943-ban kezdetleges meteorológiai radarokat is használtak az időjárás előrejelzésére a hajók és a légi járművek számára. A technológia a világ számos pontján az 1950-es években terjedt el, legyen az USA, Európa vagy a Szovjetunió. A világháborút követő évtizedekben a radarok egyre fontosabb szerepet kaptak az időjárás-előrejelzésben és a meteorológiai, éghajlati megfigyelésekben. A radarok segítették az időjárási viszonyok és viharok követését, így előrevetítettek meteorológiai jelenségeket, mint az eső, a hó, a viharok és más meteorológiai jelenségek. Ezáltal növelték az előrejelzések pontosságát és az időben történő riasztásokat, aminek jelentős szerepe volt a veszélyes időjárási körülmények kezelése szempontjából a repülési és hajózási tevékenységek megtervezése során [5], [21].

### 3. Radarok csoportosítása

Mint minden mást, a radarokat is csoportosíthatjuk különböző „jellemvonásaik” szerint. A két legfontosabb csoportosítási szempont a működési elv és a felhasználás [10], [24], [28].

#### 3.1. Működési elv szerint

Két alapvető technológia van a radarok működési elve szerint, ezek felderítési mechanizmusban teljesen eltérnek egymástól [24], [28].

##### 3.1.1. Elsődleges radarok

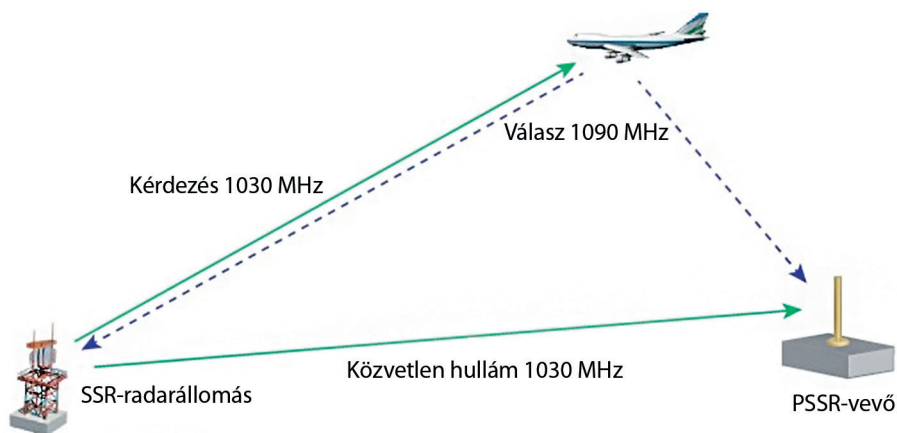
Az elsődleges radar (Primary Surveillance Radar) működési alapelve az, hogy a radarantenna nagy teljesítményű elektromágneses impulzust bocsát ki a felderítendő céltárgy irányába, az elektromágneses impulzus visszaverődik a repülő tárgyról, viszont ez a visszaverődő impulzus nagyságrendekkel kisebb lesz, mint a kibocsátott. A visszaverődő jel egy része a vevőbe kerül. A visszavert jel „utazási” idejéből egy számítógépes rendszer kiszámítja a céltárgy valódi távolságát. A kibocsátott jel oldalszögéből és helyszögéből pedig kiszámítható a tárgy vízszintes távolsága és a radarhoz viszonyított helyzete egyaránt [24], [25], [26].

Az elsődleges radarrendszereknek kulcsfontosságú szerepük van azon repülőgépek észlelésében, amelyek a személyzet hanyagságából adódóan vagy ellenséges céllal nem jelentkeznek be az adott ország légterébe érve a másodlagos radar által érzékelt frekvencián. Emiatt az elsődleges radarok védelmi célt szolgálnak az adott ország számára, míg napjainkban a másodlagos radarok, amelyekről a következő részben írunk, az egyre bonyolultabb nemzetközi légi forgalom lebonyolításában játszanak fontos szerepet [10].

##### 3.1.2. Másodlagos radarok

A másodlagos radar (Secondary Surveillance Radar) működési alapelve, hogy az interogátor küld egy kérdést a repülőgép-transzponder<sup>7</sup> felé 1030 MHz-en, amelyet vesz a repülőgép transzpondere és feldolgozza, majd a kérdésre a repülőgép jeladója 1090 MHz-en küld választ a földi másodlagos radarnak (4. ábra). A transzponder által küldött válasz az elmúlt évtizedek során sokat módosult, ezáltal nemcsak a repülőgép távolságát és azonosítóját adja meg, hanem különböző más adatokat is mint magasság vagy sebesség. A transzponder válasza nagyban függ az interogátor által kibocsátott kérdéstől, amely lehet Mode A, B, és S. A katonai repülőgépek irányításánál is megjelenik a másodlagos radar, azzal a különbséggel hogy a katonai gépeknél a transzponder válaszában típusát Mode 1, 2, 3, 4 kóddal jelölik, de ezek megfeleltethetők a civil változat elvárásainak. Ez a rendszer azonosítja egyedi azonosító alapján a repülőgépeket és követi azokat az általuk sugárzott jelek által, amelyeket transzponderrel sugároznak [7], [16].

<sup>7</sup> A transzponder a repülésben használt radar-válaszjeladó megnevezése, amely név az angol transmit (továbbít, sugároz) és responder (válaszadó) szavak összevonásából származik.



4. ábra

Másodlagos radar működése, az interogátor és a transzponder kommunikációja [22]

A másodlagos radarok fő funkciói közé tartozik a repülőgépek pontos azonosítása és követése a légtérben, amely lehetővé teszi a légi irányítók számára a biztonságos légi forgalom irányítását és felügyeletét. Emellett elengedhetetlenek a légi közlekedési hatóságok számára a légi forgalom felügyeletében és a biztonsági intézkedések végrehajtásában [7], [16].

### 3.2. Rendeltetés szerint

A légi közlekedés biztonságának növelése miatt a repülőterek üzemeltetői több részre osztották a feladatokat, amelyekhez radarberendezés szükséges. E feladatok ellátására különböző adottsággal rendelkező berendezéseket követelnek meg [10].

#### 3.2.1. Távolkörzeti radar (Air Route Surveillance Radar)

A távolkörzeti radarberendezések olyan rendszerek, amelyek nagy távolságra képesek észlelni és követni a repülőgépeket. Ezek a berendezések kiterjedt területeket képesek lefedni, mert nagy hatótávolsággal rendelkeznek, ami lehetővé teszi a korai figyelmeztetést és az idejében történő reagálást a légtérben zajló eseményekre [10].

#### 3.2.2. Közelkörzeti radar (Terminal Surveillance Radar)

A közelkörzeti radarberendezés a repülőterek közelkörzeti területeiben megnövekedett számú repülőgép felszállását, leszállását és átrepülését hivatott követni. Vannak közelkörzetek, ahol csak az adott repülőtér légi forgalmát kell követni, ezért rendszeresen ellátja a repülőtéri ellenőrző radar szerepkörét is. Működésileg és felépítésileg nagyon hasonló a távolkörzeti radarhoz, viszont hatótávolságban elmarad attól [10].

### 3.2.3. Repülőtéri légtérelenőrző radar (Airport Surveillance Radar)

Míg a közelkörzeti radar egy bizonyos körzet összes repülőtérének légtérforgalmát irányítja, addig bizonyos nagy forgalmú repülőterek ezenkívül el kell legyenek látva saját légtérelenőrző radarral. Ez a radar műszeres megközelítés végrehajtására is alkalmas [10].

### 3.2.4. Leszállító radar (Precision Approach Radar)

Ez a radarberendezés a futópálya precíziós megközelítését teszi lehetővé különböző időjárási viszonyok között [10].

### 3.2.5. Repülőtéri ellenőrző, gurító radar

E radartípusok a repülőtér földi forgalmát figyelik, beleértve a futópályát és a taxiutakat. A repülőtér földi forgalmába beletartoznak a nem repülő járművek, mint például a földi kiszolgálást segítő járművek [10].

## 4. Magyarország korszerű radartechnikája

Magyarország NATO-csatlakozásának egyik feltétele volt, hogy a szövetség által használt valamely radartechnikára váltsa le az elavult P-37 szovjet gyártmányú lokátort (adatok az 1. táblázatban láthatók) [17].

Magyarország a P-37 rádiólokátorok modernizálása mellett vásárolt három darab olasz gyártmányú, RAT-31 DL típusú háromdimenziós távolkörzeti radart. Ezeket az ország három különböző pontjára úgy helyezték el, hogy lefedje Magyarország egész légtérét 500 km-es hatótávolságával, ezért Békéscsaba, Bánkút és Medina lett a telepítési hely. A RAT-31 DL rádiólokátor egy L-sávú, szilárd testű, fázisvezérelt, 3D-s felderítő lokátor. A radarantennatömbök egy gömb alakú búrával vannak körülvéve a mechanikai védelem érdekében (5. ábra) [17].



5. ábra

A Békéscsabán üzemelő RAT-31 DL radarkomplexum [17]

A RAT-31 DL radarkomplexum felépítése tartalmaz egy elsődleges és egy másodlagos radarrendszert. Ezek egymásra helyezve növelik a megbízhatóságot, mi több, a fent említett ismeretlen gépek is felderíthetővé válnak, amelyek nem kommunikálnak a másodlagos radarral [17], [18].

1. táblázat  
A szovjet P-37 és a RAT-31 DL összehasonlítása [17]

|                                            | P-37<br>„Bar Lock”    | RAT-31DL          |
|--------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| frekvencia                                 | 2695–3115 MHz (S-sáv) | 1–2 GHz (L-sáv)   |
| antennafelület                             |                       | 77 m <sup>2</sup> |
| radarimpulzus ismétlődési idő [PRT]        | 2,6 ms; 1,3 ms        |                   |
| radarimpulzus ismétlődési frekvencia [PRF] | 375 pps; 750 pps      |                   |
| radarimpulzus hossza [τ]                   | 1,2 μs                |                   |
| csúcsteljesítmény                          | 5–700 kW              | 84 kW             |
| átlagteljesítmény                          | 5–700 W               |                   |
| mérési távolság                            | 350 km                | 500 km            |
| sáv szélesség                              | 2°                    |                   |
| találatok pásztázásonként                  | > 8                   | 1–3               |
| antennaforgási sebesség                    | 3/6 rpm               | 6 rpm             |

## 5. A radartechnológia jelen és jövőbeli fejlődése

A rádiólokáció napjainkban fejlődő iparág, mivel a leterhelt légtér és légi forgalom figyelése és a katonai repülő eszközök elhárításának fontossága a 21. században új értelmet nyert, emiatt a radartechnika egyre pontosabbá válása kulcsfontosságú az adott országok számára [1], [3].

### 5.1. Újítások és fejlesztések a radartechnológiában

A 21. században a radartechnológiában számos jelentős innováció és korszerűsítés jelent meg, köztük a Magyarországon rendszeresített RAT-31DL típusú radar is példa rá. E korszerű technológiai innovációk jelentősen javították a radarok teljesítményét és alkalmazhatóságát civil és katonai szempontból egyaránt. Ezek közé tartozik a digitális jelfeldolgozás elterjedése, amely lehetővé teszi a radarjelek pontosabb elemzését és a háttérzaj csökkentését, ezáltal növelve a radarok érzékenységét és hatékonyságát [13], [30].

A széles sávú és többsávú radarok elterjedése további információkat nyújt a célokról és növeli a radarok alkalmazhatóságát változatos környezetekben. Ezzel szemben az aktív elektronikus szkennelés (AESA)<sup>8</sup> lehetővé teszi az elektronikus irányítást és fókuszálást, ami gyorsabb és hatékonyabb célkövetést tesz lehetővé [6], [30].

<sup>8</sup> Active Electronically Scanned Array – aktív elektronikusan pásztázott tömb: egy számítógép által vezérelt antennatömb, amelyben a rádióhullámok nyalábjá elektronikusan irányítható különböző irányokba az antenna mozgása nélkül.



Az adaptív impulzus sűrűségű<sup>9</sup> (APD-)<sup>10</sup> radarok képessé teszik az impulzusok sűrűségének dinamikus változtatását a környezeti viszonyoknak és a célok jellemzőinek megfelelően, ezzel növelve a radarok rugalmasságát és alkalmazhatóságát. Emellett az automatizált célfelismerő és -követő rendszerek segítenek azonosítani és követni a potenciális célokat nagy adatmennyiségek mellett is [1], [20].

## 5.2. A radarok általános kihívásai és technikai korlátai

A radarok működése számos kihívással és technikai korlátozással jár együtt. Ezek a kihívások jelentősen befolyásolhatják a radarok hatékonyságát és pontosságát, valamint korlátozhatják alkalmazási területeiket is. Az egyik legfontosabb kihívás a radarok számára a szóródás és visszaverődés. A változó környezeti tényezők, az időjárás vagy a környező tárgyak, jelentős szóródást és visszaverődést okozhatnak, ami nehezítheti a célok pontos észlelését és követését. Ennek kiküszöbölésére a statikus tárgyakat a radarrendszer nem jeleníti meg [24].

A radarokat zavarhatja az elektromágneses interferencia, amelyeket más eszközök vagy a környezet sugároz. Ezek a nem befolyásolható zavarok akadályozhatják a radarok pontosságát [20]. A radarok hatótávolsága korlátot jelent az elektromágneses hullámok terjedési tulajdonságai miatt, mivel a föld görbületének következtében egy bizonyos távolságnál tovább nem képes látni az észlelendő tárgyat, ha az túl alacsonyan van, és amiatt nem tud a kibocsátott hullám róla visszaverődni [25], [26].

A radarok képességei határainak meghatározásában az is fontos tényező, hogy milyen felbontású képet tudnak alkotni a környezetükről. A térbeli felbontás fontos tényező, amely befolyásolhatja a radarok teljesítményét. A radar térbeli felbontása az a képesség, amely lehetővé teszi a radarrendszer számára, hogy megkülönböztesse a különböző tárgyakat vagy célokat térbeli elhelyezkedésük alapján. Mindez alapvető fontosságú a radarrendszer teljesítményének és funkcionalitásának szempontjából. Kisebb célok észlelése vagy a célok közötti megkülönböztetés néha kihívást jelenthet ebből a szempontból. A nagy hatótávolságú és magas felbontású radarrendszerek magas energiaigénnyel járnak, ami további korlátokat jelenthet az elterjedésüket és alkalmazhatóságukat tekintve [13], [27]. Ezenkívül a kisebb célok észlelése vagy a célok közötti megkülönböztetés is nehezebb lehet a nagyobb térbeli felbontású rendszerek esetében. Ezért fontos a radarrendszerek tervezése során figyelembe venni az egyensúlyt a felbontás, a hatótávolság és az energiafogyasztás között.

A radarok által gyűjtött adatok feldolgozása és értelmezése is komoly számítási kapacitást igényel a nagy mennyiségű adatok elemzése során. Az automatizált célfelismerés és követés rendszereinek fejlesztése jó út lehet a radarok modernizációja szempontjából. Ezek a kihívások és korlátok komplex tervezést és fejlesztést igényelnek annak érdekében, hogy a radarok hatékonyan működjenek és kielégítsék az adott alkalmazási igényeket [2].

<sup>9</sup> Ez a radartípus fejlett feldolgozási technikákat alkalmaz a célpontok felderítésének és követésének javítására kedvezőtlen időjárási körülmények között. Az adaptív impulzussűrűségű radart úgy tervezték, hogy a radarjelek átviteli teljesítményét és frekvenciáját az adott környezet és a célpont jellemzői alapján optimalizálja. Ez pontosabb és megbízhatóbb észlelést tesz lehetővé, ami különösen hasznos az olyan alkalmazásokban, mint az időjárás-figyelés, a légi forgalmi irányítás és a katonai megfigyelés.

<sup>10</sup> Adaptive Pulse Density – adaptív impulzussűrűség.

Tehát ezek az általános kihívások és technikai korlátok (úgy mint a zavarok és az interferencia, a térbeli felbontás és a hatótávolság, az energiafogyasztás, a célok megkülönböztetése, a szögfelbontás és a fedett területek) rámutatnak arra, hogy a radarrendszerek fejlesztése és működtetése bonyolult feladat lehet, és számos tényezőt kell figyelembe venni a hatékony és megbízható működés érdekében. A radarrendszerek tervezése során ezeket a tényezőket mindig figyelembe kell venni, hogy optimalizálják a teljesítményt és a funkcionalitást a kívánt alkalmazásokban.

## 6. Következtetés

A radartechnológia fejlődése az elmúlt évtizedekben nagyon jelentős volt, és ma is fontos szerepet játszik a különböző területeken, mint például a katonai felderítés, a légi forgalom irányítása, az űrkutatás, a meteorológia, vagy éppen az autonóm járművek. A radartechnológia jövőbeni fejlődésében több kutatási irány is kirajzolódik, mint például a növekvő felbontás és pontosság. Ez várhatóan lehetővé teszi majd a kisebb célok jobb észlelését és azonosítását. A következő terület a fejlesztés terén az új frekvenciák felhasználása, ami a hagyományos rádiófrekvenciák mellett egyre nagyobb figyelmet fordít a milliméteres és szubmilliméteres hullámhosszúságú rádióhullámok, valamint a LIDAR<sup>11</sup> radarok kutatására és fejlesztésére. Ezek a rendszerek lehetővé tehetik a nagyobb adatsűrűségű információgyűjtést és a jobb felbontású képek elérését. Ilyen további kutatás lehet még a mesterséges intelligencia és gépi tanulás alkalmazása. A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás egyre nagyobb szerepet kap a radaradatok feldolgozásában és értelmezésében. Ezeknek a technológiáknak a célok azonosításában, a zavaró jelenségek szabályozásában és a radarrendszerek hatékonyságának növelésében is feladata lesz. A mikroelektronika és a nanotechnológia fejlődésének köszönhetően a radarrendszer méretének és költségének csökkentése lehet a miniatűr radarrendszerek hatalmas nyeresége. Ezáltal lehetővé válik majd a minél szélesebb körű alkalmazás például a személyi elektronikai eszközökben, a földi-vízi járműveken, vagy éppen a pilóta nélküli légi járművek fedélzetén, amelyek ezáltal a fedett nemzetbiztonsági jellegű műveletekben is nagyobb szerepet kaphatnak [15]. Végül a kvantumtechnológiával összhangban a jövőben várható fejlődésnek a kvantumradarok is részei lehetnek, amelyek a kvantumelv<sup>12</sup> alapján működnek, és lehetővé teszik a jelenlegi radarrendszerekkel összehasonlíthatatlanul jobb teljesítményt és pontosságot.

Összességében elmondható, hogy a radartechnológia folyamatosan és dinamikusan fejlődik, az új technológiák és alkalmazási területek felhasználása során mindinkább hatékonyan, olcsóbban, pontosabban és lényegesen szélesebb körben használható.

<sup>11</sup> A LIDAR (Light Detection and Ranging) olyan technológia, amelyet távolságok mérésére és tárgyakról és környezetekről nagy felbontású 3D-képek készítésére használnak. Lézersugarakat bocsát ki, és rögzíti a sugarak visszaverődésének idejét, ami pontos méréseket és térképezést tesz lehetővé.

<sup>12</sup> A kvantummechanikai határozatlansági reláció alapvető, elméleti határ bizonyos fizikai mennyiségek egyszerre, teljes pontossággal való megismerhetőségére. Ilyen mennyiségpár például a hely és az impulzus, minél pontosabb értéke van az egyiknek, annál pontatlanabb a másiknak.

## Felhasznált irodalom

- [1] Balajti I., „A magyar légtérellenőrzés jövőbeni műszaki kihívásai,” *Haditechnika*, 52. évf. 3. sz. pp. 27–31. 2018. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.52.2.07>
- [2] Balajti I., „A XXI. századi radarrendszerekkel szemben támasztható elvárások,” *Haditechnika*, 53. évf. 3. sz. pp. 3–8. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.3.01>
- [3] Balajti I., „Új kihívások a hazai légtérellenőrzésben,” *Haditechnika*, 53. évf. 2. sz. pp. 2–7. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.2.01>
- [4] Britannica, *magnetron*. szócikk, [é. n.]. Online: [www.britannica.com/technology/magnetron](http://www.britannica.com/technology/magnetron)
- [5] Budai O., *Földbázisú távérzékelés a meteorológiában*. Szakdolgozat, Budapest, ELTE, 2009. Online: [https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/Budai%20Oliver\\_2009.pdf](https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/Budai%20Oliver_2009.pdf)
- [6] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, H. M. Jones, E. C. Poggio, „Developments in Radar Imaging,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20. évf. 4. sz. pp. 363–400, 1984. Online: <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.4502060>
- [7] D. G. Terrington, „Development of Secondary Surveillance Radar for Air-Traffic Control,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 112. évf. 5. sz. p. 861, 1965. Online: <https://doi.org/10.1049/piee.1965.0150>
- [8] Almássy Gy. szerk., *Mikrohullámú kézikönyv*. Budapest, Műszaki, 1973.
- [9] Farkas V., *Mikrohullámú technika I.*, 2. kiadás, Budapest, Műszaki, 1980.
- [10] Géczi J., Békési L., „A repülésben alkalmazott radarrendszerek,” *Repüléstudományi Közlemények*, Különszám, pp. 1–5. 2007. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/51>
- [11] Kalina B., „Magyar lokátorfejlesztések 1950–1953,” in *Ezer év innováció Magyarországon (a 2000. évi ankét anyaga)*. Tanulmányok a természettudományok, a technika és az orvoslás történetéből. Budapest, Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége Tudomány- és Technikatörténeti Bizottsága, pp. 105–107. 2001. Online: <https://doi.org/10.23716/TTO.08.2001.15>
- [12] Kibra, *Korai radarfejlesztések*. [é. n.]. Online: <http://users.atw.hu/kibra/site/page.php?147>
- [13] M. E. Russell, „Future of RF Technology and Radars” in *2007 IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, USA, Apr. 2007, pp. 11–16. Online: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374184>
- [14] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek használata az elektronikai hadviselésben,” *Repüléstudományi Közlemények*, 29. évf. 3. sz. pp. 301–315. 2017. Online: [www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017\\_3/2017-3-22-0490\\_Major\\_Gabor.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-22-0490_Major_Gabor.pdf)
- [15] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások,” *Repüléstudományi Közlemények*, 27. évf. 1. sz. pp. 115–120. 2015. Online: [www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015\\_1/2015-1-10-0181-Major\\_Gabor.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf)
- [16] O. O. Strelnytskyi, I. V. Svyd, I. I. Obod, O. S. Maltsev, G. E. Zabolodko, „Optimization of Secondary Surveillance Radar Data Processing,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 11. évf. 5. sz. pp. 1–8. 2019. Online: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2019.05.01>
- [17] Rajnai J. I., „A Magyar Honvédség NATO-kompatibilis 3D radarállomásai,” *Haditechnika*, 52. évf. 6. sz. pp. 27–30. 2018. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.52.6.09>
- [18] S. Tomei, et al., „Progress on the Study for the Use of Long-Range Radars for Space Situational Awareness” *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*, Florence, Italy, 2020, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266560>

- [19] Seller R., Pető T., Dudás L., Kovács L., „Passzív radar I. rész,” *Haditechnika*, 53. évf. 6. sz. pp. 51–55. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.6.10>
- [20] Szökrényi Z., „Radarok elektronikai védelme II. Gyakorlati megközelítés,” *Hadmérnök*, 14. évf. 1. sz. pp. 297–320. 2019. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.24>
- [21] Szupercella.hu, *Radaros alapismeretek 2.* 2011. Online: [www.szupercella.hu/radar2](http://www.szupercella.hu/radar2)
- [22] T. Otsuyama, J. Honda, K. Shiomi, G. Minorikawa, Y. Hamanaka, „Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance,” *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 2015, pp. 1527–1530. Online: <https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7346066>
- [23] Tóth F., „A radartechnika alapjai 1. rész – Történeti áttekintés,” *Magyar Elektronika*, 2016. január 26. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-1-resz-toerteneti-attekintes](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-1-resz-toerteneti-attekintes)
- [24] Tóth F., „A radartechnika alapjai 2. rész – A működési elv,” *Magyar Elektronika*, 2016. március 8. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-2-resz-a-mkoedesi-elv](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-2-resz-a-mkoedesi-elv)
- [25] Tóth F., „A radartechnika alapjai 3. rész – A radar hatótávolsága,” *Magyar Elektronika*, 2016. április 11. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-3-resz-a-radar-hatotavolsaga](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-3-resz-a-radar-hatotavolsaga)
- [26] Tóth F., „A radartechnika alapjai 5. rész – Hatótávolság: néhány további kérdés,” *Magyar Elektronika*, 2016. június 6. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-5-resz-hatotavolsag-nehany-tovabbi-kerdes](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-5-resz-hatotavolsag-nehany-tovabbi-kerdes)
- [27] Tóth F., „A radartechnika alapjai 6. rész – A radaregnyelet a gyakorlatban,” *Magyar Elektronika*, 2016. augusztus 4. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radar-technika-alapjai-6-resz-a-radaregnyelet-a-gyakorlatban](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radar-technika-alapjai-6-resz-a-radaregnyelet-a-gyakorlatban)
- [28] Tóth F., „A radartechnika alapjai 9. rész – Másodlagos radarrendszer,” *Magyar Elektronika*, 2016. november 10. Online: [www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radartechnika-alapjai-9-resz-masodlagos-radarrendszer](http://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radartechnika-alapjai-9-resz-masodlagos-radarrendszer)
- [29] V. G. Gorokhov, *Scientific Investigation, Technological Development and Economical Governmental Support: The Historical Development of RADAR Science and Technology*. 2009. Online: [www.itas.kit.edu/pub/v/2009/goro09a.pdf](http://www.itas.kit.edu/pub/v/2009/goro09a.pdf)
- [30] W. Wiesbeck, L. Sit, „Radar 2020: The Future of Radar Systems,” *2014 International Radar Conference*, Lille, France, 2014, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060395>

## ***The Development History of Radiolocation and Its Role Nowadays***

*The discovery and use of radio waves proved to be a huge technological opportunity in the hands of people. This made it possible to accurately determine the location of various radio wave reflective objects. In my study, I would like to examine the process of the development history of this invention, called radar, from the first moment to the present day. Demonstrating the significant role of the military industry during the development of radar systems is one of the important pillars, the other pillar is the constant increase in the safety and efficiency of civil aviation. Even today, these radar systems undergo constant development thanks to the new technological achievements.*

**Keywords:** *radar, locator, radio reconnaissance, development, detection, accuracy, radio wave, antenna*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dr. Major Gábor<br>adjunktus<br>Nemzeti Közszerológati Egyetem<br>Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar<br>Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék<br><a href="mailto:major.gabor@uni-nke.hu">major.gabor@uni-nke.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0003-2927-127X">orcid.org/0000-0003-2927-127X</a>                                                             | Gábor Major, PhD<br>Senior Lecturer<br>Ludovika University of Public Service<br>Faculty of Military Science and Officer Training<br>Department of Aircraft Onboard Systems<br><a href="mailto:major.gabor@uni-nke.hu">major.gabor@uni-nke.hu</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0003-2927-127X">orcid.org/0000-0003-2927-127X</a>                                               |
| Albert Csongor<br>BSc-hallgató<br>Nemzeti Közszerológati Egyetem<br>Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar<br>Állami Légiközlekedési Szak<br>Katonai Repülőműszaki Szakirány<br>Avionika Modul<br><a href="mailto:albert.csongor2016@gmail.com">albert.csongor2016@gmail.com</a><br><a href="https://orcid.org/0009-0003-2503-4012">orcid.org/0009-0003-2503-4012</a> | Csongor Albert<br>BSc student<br>Ludovika University of Public Service<br>Faculty of Military Science and Officer Training<br>State Aviation Faculty<br>Military Aeronautical Engineering<br>Avionics Module<br><a href="mailto:albert.csongor2016@gmail.com">albert.csongor2016@gmail.com</a><br><a href="https://orcid.org/0009-0003-2503-4012">orcid.org/0009-0003-2503-4012</a> |

Mhd Bashar Al Kazzaz, Árpád Veress

## Towards Greener Skies: Past Achievements and Future Horizons of Sustainable Aviation Fuels

*Nowadays industries worldwide are transforming to become more climate and environment aware, hence there is a radiant shift of focus and demand toward more green and sustainable solutions which can be easily spotted in various inventions and developments. Aviation is no stranger to these demands if not the most pressurised sector to reduce its environmental footprint, while accommodating the growing demand for air travel. The increased number of funded research in the field of creating new generation and greener aircraft (electrical, hybrid, hydrogen) is the proof of that quest. Pursuing those goals is very important, however, it is safe to say that the industry still has a long way to go. The proposed solutions, while very innovative, lack the resources to provide safe and economical operational flights due to immature technological tools. Therefore, a quick and alternative way was sought after in the meantime, which is what made sustainable aviation fuels (SAF) emerge as a viable option for reducing greenhouse gas emissions and promoting environmental sustainability in aviation. This paper presents a detailed review of SAF's previous accomplishments and future possibilities and aspects.*

**Keywords:** sustainability, reduce greenhouse effects, reduce exhaust gas emissions, green aviation, sustainable aviation fuel, SAF

### 1. Introduction

In the past years, various fields and sectors of different industries have been focusing and investigating their negative imprint on the global climate and environment. However, since transportation is regarded as one of the major contributors to today's pollution, it is notable that transportation fields are making a huge effort to limit their negative impact.

Air travel plays a fundamental role in global connectivity and economic growth, it has unquestionably transformed human mobility, allowing for fast travel across enormous distances and connecting diverse parts of the world. However, this contemporary marvel has a high environmental cost, with aviation becoming a major producer of greenhouse gas emissions and air pollution. In the past years, aviation represented 2% of the worldwide energy-related CO<sub>2</sub> emissions, which shows that it had increased more rapidly in recent decades than railway transport, road, or even shipping. As worldwide travel demand rebounds after the Covid-19 pandemic, in 2022 aircraft emissions were estimated to have reached

approximately 800 Mt CO<sub>2</sub> which is equivalent to 80% of pre-pandemic levels according to the International Energy Agency (IEA) [1].

Taking into consideration the relatively high percentage of CO<sub>2</sub> emission, it became crucial to understand how to reduce this percentage to an acceptable rate. Of course, this emission comes from the combustion of fossil jet fuels, which are primarily derived from petroleum, by combustion they can produce approximately 70% of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from the total gas exhaust, and water vapour (H<sub>2</sub>O), which is equal to 30%. Less than 1% of the total combustion exhaust gases are made of pollutants like nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), oxides of sulphur (SO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), partially combusted or unburned hydrocarbons (HC), particulate matter (PM), and other trace compounds [2].

By taking a more in-depth investigation of the emissions, the results show that the air travel impact on climate change is more complicated, it depends on multiple parameters and factors such as altitude and power of the engines. The jet aircraft's impact on the climate is explained clearly in Figure 1, the data collected in this figure was taken from the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The cloud behind the airplane contains the different gases and particles produced by jet fuel combustion (kerosene). The warming or cooling effect of these gases is explained in detail below the cloud in the "Climate Impact" line, and the blue and red coded bar gives a clear idea of a comparison of each exhaust product to the warming effect of CO<sub>2</sub>, where red indicates to a warming impact and blue indicates to a cooling effect [3].

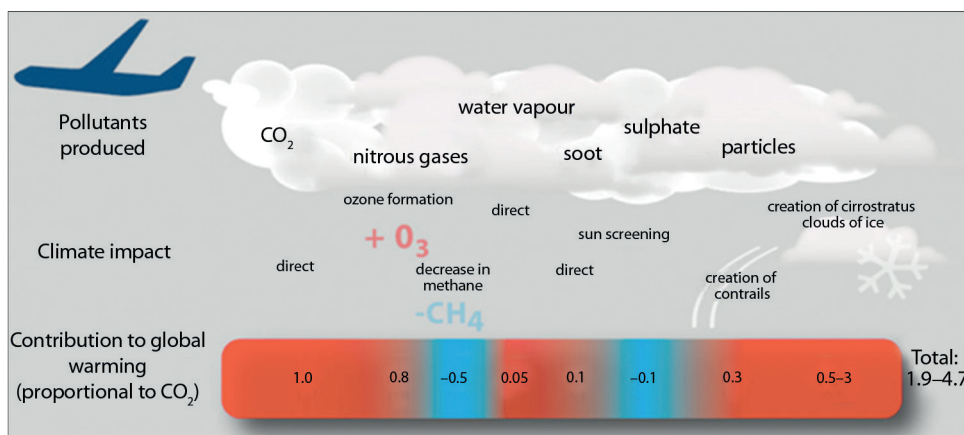


Figure 1.  
Effect of aviation on the global climate [3]

The increase in fossil fuel consumption enhanced Greenhouse Gas emissions (GHG), which led to prominent changes to the climate. These changes were manifested in the form of increased temperatures and global warming [4]. Hence, trying to mitigate the bad impact of fossil fuels has become crucial to the continuity and strength of air travel. Within this context, sustainable aviation fuels (SAF) rose to be a potential and promising solution for reducing the aviation footprint on the atmosphere. Additionally, it will give the means to energy security and help transition the industry to more sustainable and green developments.



In this paper, the focus will be shed on the historical overview of sustainable aviation fuels (SAF), the economic and environmental benefits of the SAF, the current state, and the future prospects.

## 2. Overview of aviation fuels

Standard jet fuel is unique in the form that it is made in a way to meet the strict and international standards. The specifications of regular jet fuels are developed to be usable at low temperatures and offer the high power needed for the engines, these fuels are characterised to have heavier density in comparison with other fuel types, or, in other words, "heavier" than normal gasoline, they have a higher flash point and lower freezing point [5].

However, since regular jet fuel is a form of fossil fuel, it has consequently a high carbon emission. Although there is a lot of research in the pipeline for greener engine solutions such as hydrogen or electrical engines, it is safe to state that these technologies are not ripe yet and the industry still needs to go a long way to arrive at that point.

Sustainable fuels though offered a great alternative and a great opportunity for airliners to cut down on the bad impact of flying to the environment. Reducing emissions is the key factor of focus today to achieve the net-zero carbon goal by the year 2050 which is a common objective for all international aviation industries [6].

### 2.1. Conventional fossil jet fuel

Conventional fossil jet fuel or in another word kerosene is produced through a complex combination of processes for crude oil, where the various fuel types are separated based on their boiling point, kerosene has a boiling point range of 130–300 °C [7].

Kerosene is a complex mixture of hydrocarbons that can be categorised into 4 main groups, which are illustrated in Figure 2.

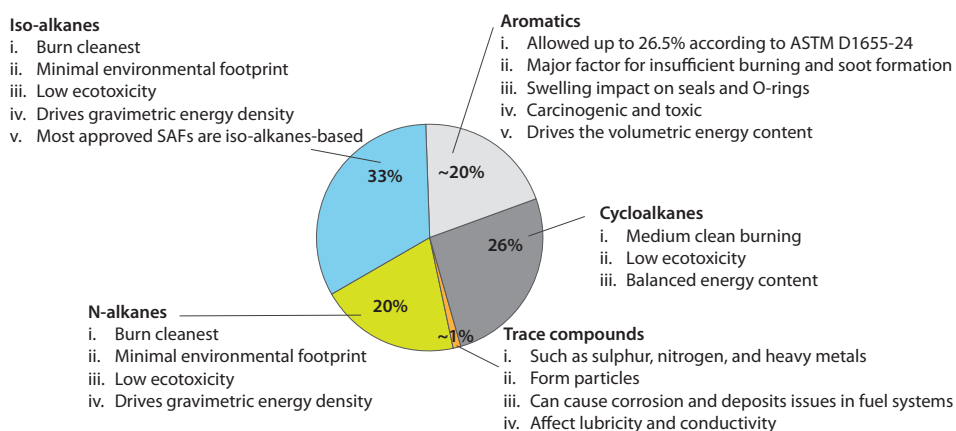


Figure 2.

*Volumetric share of compounds in kerosene [the authors]*

N-alkanes have a straight-chain structure with no branches, while iso-alkanes are branched-chain alkanes, they have the same molecular formula as n-alkanes but are different in the arrangement of carbon atoms, featuring at least one branch, as shown in Figure 3. Both n-alkanes and iso-alkanes have the same formula described by Equation 1.

$$C_n H_{2n+2}$$

In cycloalkanes, the carbon atoms are connected in a ring or cyclic structure as shown in Figure 3, with the general formula Equation 2.

$$C_n H_{2n}$$

Aromatic compounds feature a ring of carbon atoms with alternating double and single bonds, as shown in Figure 3, which can be described by the general Equation 3 [8].

$$C_n H_{2n-6}$$

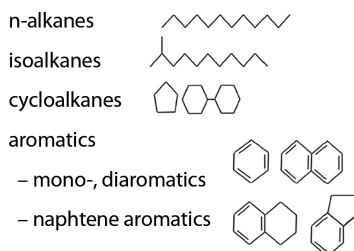


Figure 3.  
Main compounds in kerosene [9]

These hydrocarbons can be grouped together based on their carbon numbers which are normally allocated as shown in Figure 4, the majority of compounds have carbons in the range of C8 to C16, however, compounds up to C19 might be found [8].

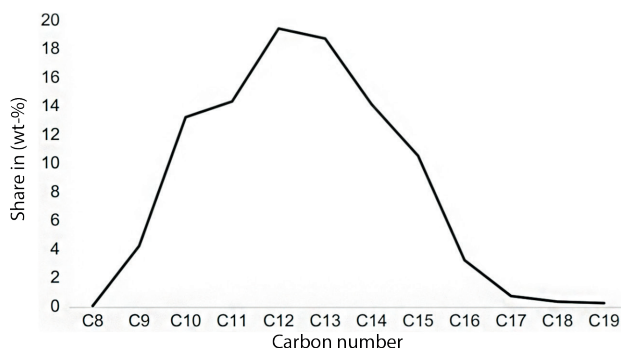


Figure 4.  
Distribution of carbon numbers in kerosene [8]

## 2.2. SAF introduction

Sustainable aviation fuels (SAF) or as alternately known as the next generation fuels have already been used today in many countries and by many consumers or airlines. SAF is a combination of traditional fossil fuels and synthetic components derived from a variety of renewable resources for example used cooking oils, animal fats, plant oils, and municipal, agricultural, and forestry waste.

So far aircraft manufacturers have only certified their aircraft to fly with a maximum of 50% combination of SAF with other standard jet fuels [10], with a forecasted vision that this rate will reach 100% by 2030.

The reason for this enormous focus on SAF and related research is that the aircraft already produced and operated cannot be scrapped if new generation aircraft (electric/hydrogen) get invented due to obvious economic reasons.

According to the International Civil Aviation Organization (ICAO) [11], the American Society for Testing and Materials (ASTM) has certified and approved the use of seven pathways to produce synthesised (non-petroleum) jet fuel blending components [12]. However, according to Airbus, the most used blending pathways are Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol to Jet (AtJ) and e-fuels [10]. The timeline of the certification of different SAF pathways is illustrated in Figure 5.

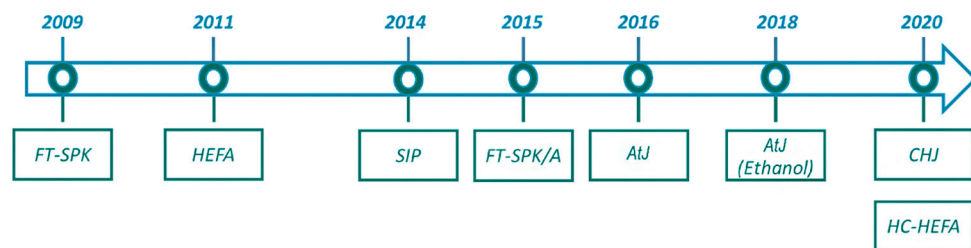


Figure 5.  
Time stamp of SAF [13]

## 2.3. Most common SAF pathways

### 2.3.1. Hydrotreated esters and fatty acids (HEFA)

HEFA pathway was approved back in 2011, with a blending limitation ratio with fossil fuel of 50%, the chemical process includes the conversion of woody biomass to syngas by utilising the process of gasification, then a synthesis reaction called Fischer-Tropsch converts the syngas to jet fuel [14]. Feedstocks include different types of renewable biomass, primarily woody biomass such as municipal solid waste, agricultural wastes, forest wastes, wood, and energy crops [15]. As illustrated in Figure 6, HEFA from palm oil and used cooking oil (UCO) are the most cost-effective [16], making HEFA one of the feasible future solutions in the mid-and long-term taking into consideration the limited feedstock availability, which still represents a major challenge [17].

### 2.3.2. Alcohol-to-Jet (AtJ)

Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene was certified for use by commercial aircraft in 2016 for isobutanol and in 2018 for ethanol at a 50% mixing ratio. It is primarily manufactured by turning cellulosic or starchy alcohol (isobutanol and ethanol) into a drop-in fuel by a sequence of chemical events such as dehydration, hydrogenation, oligomerisation, and hydrotreatment. Alcohols are produced from cellulosic or starchy feedstock via fermentation or gasification processes. Ethanol and isobutanol generated from lignocellulosic biomass (such as corn stover) are regarded as suitable feedstocks [13].

As shown in Figure 2, aromatics have a toxic and carcinogenic effect which means SAF with free aromatics is beneficial for air quality and the environment but unfortunately, aromatics play a very important role in the engine fuel system (e.g. rubber seals), since the experimental results show that the relationship between the rate of seal swelling and total aromatic content and fuel type is in fact linear [18], which means SAF with low aromatics content causes leakages in the fuel system leading to airworthiness consequences, from this point of view, AtJ is an option for future 100% SAF because it is possible to produce SAF that contains aromatics [15].

### 2.3.3. Fischer–Tropsch synthesised kerosene (FT-SPK)

FT-SPK pathway was approved back in 2006, it is liquid hydrocarbons that are created by the conversion of syngas's catalytic which is a mixture of CO and H<sub>2</sub> via gasification from a variety of biogenic feedstock like biomass, wood, agricultural, forest wastes, and municipal solid waste. These compounds are characterised of being non-toxic, sulphur-free, and include few aromatics content, which in the results leads to lower emissions. The Fischer–Tropsch synthesised kerosene with aromatics (FT-SPK/A) pathway was approved back in 2009, it is similar to FT-SPK but with the addition of aromatic components [13], [19].

### 2.3.4. E-fuels

The e-fuels are made by absorbing carbon dioxide from CO<sub>2</sub> available in the atmosphere from factories' exhaust or any transportation sources and producing synthetic fuels using green hydrogen and renewable power. This form of SAF is also called e-fuels or Power-to-Liquid (PtL) [20]. PtL attracted significant interest in the past decades since it was made possible to produce SAF with very low GHG emissions avoiding feedstock constraints and sustainability issues in comparison to other bio-based SAF [21].

In general, most of the current articles and research have reached the same conclusion which can be described that pathways HEFA, FT-SPK, AtJ, and PtL are cutting-edge technologies and will lead the aviation industry towards the targeted fuel transition [13]. These pathways are the most efficient solutions for the near future due to their high technological readiness [22]. The ideal option for commercialisation is HEFA, but FT-SPK and AtJ procedures can also be efficient routes to improve their cost-effectiveness [23].

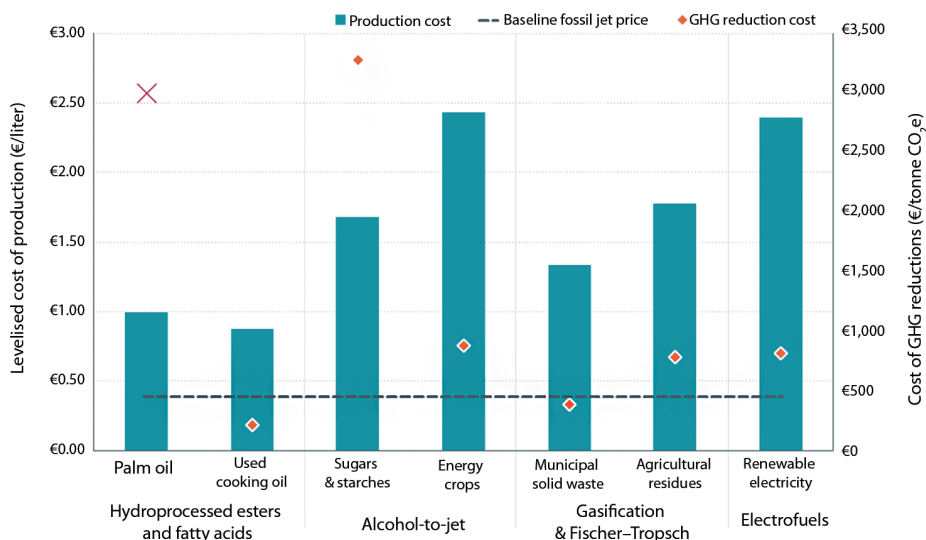


Figure 6.

HEFA, AtJ, FT-SPK, and e-fuels estimated costs compared with kerosene price [16]

### 3. Future milestones and vision

Based on the above chapters it is clear that the research is quite intense about different mixing ratios and combinations of fuels. The future improvements and visions can be categorised into two main topics, the first topic is dealing with increasing the SAF share in the final mixture (considering ASTM D7566 requirements) and the second topic is finding new solutions to make the current engines (which are already in service) capable to be fed with higher SAF content. The importance of the last topic lies in the fact that most engines and aircraft manufacturers confirmed that all their productions will be compatible with 100% SAF by 2030. However, according to the EASA environment report, aircraft can remain in service for about 30 years [24], meaning that current aircraft/engines which are manufactured in 2024 (and compatible with 50% SAF) may stay in service until 2054, which will be the majority of fleets in the mid-future.

The new ReFuelEU Aviation regulations help to provide a high, standard level of environmental protection in the aviation industry as shown in Figure 7. The goal of 2050 is for 70% of all the fuel supplied in to EU airports to be SAF, of which 35% would be synthetic SAF, providing greater potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions. EASA has a special role, which is to monitor and report on the use of SAF and fossil fuels by airlines at EASA Member States' principal airports [25], [26].

Another strategy known as CORSIA developed by ICAO, which stands for the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, includes methodologies and policies aiming to mitigate greenhouse gas emissions from the aviation industry and stabilise their levels [27].

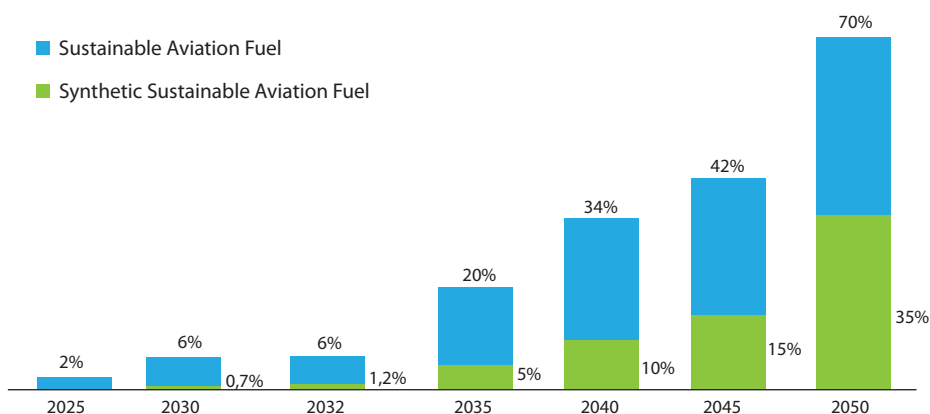


Figure 7.

*The mandatory minimum proportion of SAF in the future [25]*

## 4. Conclusion

SAF has made significant progress towards their goal of reducing emissions and improving air quality. Over the last few years, significant advances have been made in the development and implementation of SAF, demonstrating their potential to lower carbon emissions and decrease reliance on fossil fuels. Despite these accomplishments, challenges remain, such as scaling up production, lowering costs, and ensuring compatibility with aircraft, engines, and infrastructure. The future of SAFs looks promising as one can clearly see a continuing investment in this field of research. Furthermore, it is predicted that this way will be supported by regulatory policies and various collaboration efforts in between different aeronautical and aviation industries. As HEFA, FT-SPK, and AtJ are becoming more common nowadays, they will play an important role in establishing a more sustainable and environmentally friendly aviation industry, which shows the importance of investigating and researching these pathways.

## References

- [1] IEA, "Aviation." Online: [www.iea.org/energy-system/transport/aviation](http://www.iea.org/energy-system/transport/aviation)
- [2] FAA, *Aviation Emissions, Impacts & Mitigation: A Primer*. 2015. Online: [www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/Primer\\_Jan2015.pdf](http://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/Primer_Jan2015.pdf)
- [3] J. Overton, *Issue Brief | The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation (2019, revised 2022)*. EESI. Online: [www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation](http://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation)
- [4] E. Hanna, R. J. Hall, "Earth, Air, Fire and Ice: Exploring Links between Human-induced Global Warming, Polar Ice Melt and Local Scale Extreme Weather," in *Science, Faith and the Climate Crisis*, Eds., S. Myers, S. Hemstock, and E. Hanna, Emerald Publishing Limited, 2020, pp. 47–64. Online: <https://doi.org/10.1108/978-1-83982-984-020201006>

- [5] TotalEnergies, *All about JETA-1 Aviation Fuel*. [s. a.]. Online: <https://aviation.totalenergies.com/en/fuels-and-services-aviation/aviation-fuels/jet-a1>
- [6] ICAO, *ICAO's 2050 net-zero CO<sub>2</sub> Goal for International Aviation*. 2023. Online: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/global-aviation-ICAO-net-zero-goal-jan23.pdf>
- [7] M. A. Betiha, A. M. Rabie, H. S. Ahmed, A. A. Abdelrahman, and M. F. El-Shahat, "Oxidative Desulfurization Using Graphene and Its Composites for Fuel Containing Thiophene and Its Derivatives: An Update Review," *Egyptian Journal of Petroleum*, Vol. 27, no. 4, pp. 715–730, 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.10.006>
- [8] J. Pechstein and A. Zschocke, "Blending of Synthetic Kerosene and Conventional Kerosene," in *Biokerosene: Status and Prospects*, Eds., M. Kaltschmitt and U. Neuling, Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, pp. 665–686. Online: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_25)
- [9] M. Braun-Unkhoff, et al. "About the Interaction between Composition and Performance of Alternative Jet Fuels," *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 7, pp. 83–94. 2016. Online: <https://doi.org/10.1007/s13272-015-0178-8>
- [10] Airbus, *Sustainable Aviation Fuels*. Online: [www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuels](http://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuels)
- [11] S. Csonka and K. C. Lewis, "New Sustainable Aviation Fuels (SAF) Technology Pathways Under Development," in *Climate Change Mitigation*. 2022. Online: [www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art49.pdf](http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art49.pdf)
- [12] ASTM D7566-23b, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. Online: <https://doi.org/10.1520/D7566-23B>
- [13] N. Detsios, S. Theodoraki, L. Maragoudaki, K. Atsonios, P. Grammelis, and N. G. Orfanoudakis, "Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review," *Energies*, Vol. 16, no. 4, 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/en16041904>
- [14] S. S. Doliente, A. Narayan, J. F. D. Tapia, N. J. Samsatli, Y. Zhao, and S. Samsatli, "Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components," *Frontiers in Energy Research*, Vol. 8, 2020. Online: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110>
- [15] EASA, What are Sustainable Aviation Fuels? [s. a.]. Online: [www.easa.europa.eu/eao/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/what-are-sustainable-aviation-fuels](http://www.easa.europa.eu/eao/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/what-are-sustainable-aviation-fuels)
- [16] N. Pavlenko, *An Assessment of the Policy Options for Driving Sustainable Aviation Fuels in the European Union*. International Council on Clean Transportation, 1 April, 2021. Online: <https://theicct.org/publication/an-assessment-of-the-policy-options-for-driving-sustainable-aviation-fuels-in-the-european-union>
- [17] M. Bessoles, *Increasing Sustainable Aviation Fuel Production with Feedstocks for Decarbonization*. ICF, 23 March 2022. Online: [www.icf.com/insights/transportation/increasing-sustainable-aviation-fuel-production-feedstocks](http://www.icf.com/insights/transportation/increasing-sustainable-aviation-fuel-production-feedstocks)
- [18] A. Anuar, V. K. Undavalli, B. Khandelwal, and S. Blakey, "Effect of Fuels, Aromatics and Preparation Methods on Seal Swell," *The Aeronautical Journal*, Vol. 125, no. 1291, pp. 1542–1565, 2021. Online: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.25>
- [19] D. Moodley, et al., "Catalysis for Sustainable Aviation Fuels: Focus on Fischer-Tropsch Catalysis," in *Catalysis for a Sustainable Environment*, Eds., A. J. L. Pombeiro, M. Sutradhar, E. C.B.A Alegria, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 73–116. 2024. Online: <https://doi.org/10.1002/9781119870647.ch6>



- [20] K. Kitson, *Chasing the 'Green' Dream: A Brief Snapshot on the Implementation of SAFs and e-Fuels in the Aviation Industry*. International Bar Association, 2 August 2023. Online: [www.ibanet.org/green-dream-safs-aviation](http://www.ibanet.org/green-dream-safs-aviation)
- [21] A. Bauen, N. Bitossi, L. German, A. Harris, and K. Leow, "Sustainable Aviation Fuels: Status, Challenges and Prospects of Drop-In Liquid Fuels, Hydrogen and Electrification in Aviation," *Johnson Matthey Technology Review*, Vol. 64, no. 3, pp. 263–278, 2020. Online: <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>
- [22] M. Shehab, K. Moshhammer, M. Franke, and E. Zondervan, "Analysis of the Potential of Meeting the EU's Sustainable Aviation Fuel Targets in 2030 and 2050," *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 15, no. 12, p. 9266, 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/su15129266>
- [23] M. F. Shahriar and A. Khanal, "The Current Techno-Economic, Environmental, Policy Status and Perspectives of Sustainable Aviation Fuel (SAF)," *Fuel*, Vol. 325, p. 124905, 2022. Online: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>
- [24] EASA, *European Aviation Environmental Report*. Online: [www.easa.europa.eu/eco/eaer](http://www.easa.europa.eu/eco/eaer)
- [25] J. Franklin, *ReFuel EU*. EASA Community Network, 15 September 2023. Online: [www.easa.europa.eu/community/topics/refuel-eu](http://www.easa.europa.eu/community/topics/refuel-eu)
- [26] Council of the European Union, *RefuelEU Aviation Initiative: Council Adopts New Law to Decarbonise the Aviation Sector*. 9 October 2023. Online: [www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/](http://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/)
- [27] ICAO, *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*. 2024. Online: [www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA\\_Eligible\\_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20October%202024.pdf](http://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20October%202024.pdf)

---

## **Cél a zöldebbégbolt – a fenntartható repülési üzemanyagok jelene és a bennük rejlő lehetőségek jövője**

Napjainkban az iparágak világszerte átalakulnak, egyre inkább klíma- és környezetbarátabbak lesznek. A hangsúly és a kereslet a zöld és fenntarthatóbb megoldások felé tolódik, ami könnyen észrevehető a különböző találmányokban és fejlesztésekben. A légi közlekedés sem idegen ezektől az igényektől, ha nem is a legnagyobb hatással rendelkező ágazat, amely a növekvő kereslet kielégítése mellett a környezet terhelésének csökkentésére törekszik. Az új generációs és környezetbarátabb repülőgépek (elektromos, hibrid, hidrogén) létrehozására irányuló kutatások számának növekedése a legnagyobb bizonyíték erre a törekvésre. Ezeknek az irányoknak a követése nagyon fontos, azonban kijelenthető, hogy még hosszú út áll előttünk. A javasolt megoldások, bár nagyon innovatívak, a kiforratlan technológiai eszközök miatt nem rendelkeznek a biztonságos és gazdaságos üzemszerű repülésekhez szükséges erőforrásokkal. Ezért időközben gyors és alternatív megoldásokat kerestek, és ez az, ami miatt a fenntartható repülőgép-üzemanyagok (SAF) az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére és a légi közlekedés környezeti fenntarthatóságának előmozdítására szolgáló életképes lehetőségként jelentek meg. Ez a tanulmány részletesen áttekinti a SAF eddigi eredményeit, valamint a jövőbeli lehetőségeket és szempontokat.

**Kulcsszavak:** fenntarthatóság, üvegházhatás csökkentése, kipufogógáz-kibocsátás csökkentése, zöld repülés, fenntartható repülőgép-üzemanyag, SAF

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

# Tartalom

|                                                                                                                                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>FALTIN ZSOLT, ROHÁCS JÓZSEF, KAVAS LÁSZLÓ:</b><br><i>Integrált repülőterek környezetterhelés-menedzselése</i>                                                                                                                           | <b>5</b>   |
| <b>BELLER BALÁZS:</b> <i>A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója I.</i>                                                                                                                                                  | <b>19</b>  |
| <b>SCHUSTER GYÖRGY:</b> <i>A biztonságkritikus fejlesztésben alkalmazott módszertanok</i>                                                                                                                                                  | <b>35</b>  |
| <b>HALMI LAJOS:</b> <i>Az emberi tényező szerepének vizsgálata korszerű diagnosztikai és információtechnológiai eszközök alkalmazásával – különös tekintettel az orvosbiológiai monitorozás területére a repülésbiztonság aspektusából</i> | <b>47</b>  |
| <b>CSATÓ PÉTER:</b> <i>A repülőipar új korszaka: a grafénban rejlő innováció</i>                                                                                                                                                           | <b>55</b>  |
| <b>VIKTÓRIA KESZTYŰS:</b> <i>Possibilities of Air Force Cooperation in the Visegrad Countries</i>                                                                                                                                          | <b>71</b>  |
| <b>TERPE CZ GÁBOR, SCHUSTER GYÖRGY:</b> <i>Személyzet nélküli eVTOL légi járművek biztonsági kihívásai</i>                                                                                                                                 | <b>81</b>  |
| <b>LÁSZLÓ GAJDÁCS:</b> <i>The Potential Flight Safety Risks Associated with Unmanned Aerial Vehicles and the Importance of Ensuring their Visibility</i>                                                                                   | <b>97</b>  |
| <b>MAJOR GÁBOR, ALBERT CSONGOR:</b> <i>A rádiólokáció fejlődéstörténete és napjainkban betöltött szerepe</i>                                                                                                                               | <b>109</b> |
| <b>MHD BASHAR AL KAZZAZ, ÁRPÁD VERESS:</b> <i>Towards Greener Skies: Past Achievements and Future Horizons of Sustainable Aviation Fuels</i>                                                                                               | <b>123</b> |